

Tsy/3917

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS
SÉTIF

MÉMOIRE

Présenté par

DRIF Mahmoud

Pour obtenir le titre de **Magister**
de l'Institut d'Électronique

OPTION

Contrôle Industriel

**CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF
DE RÉGULATION ET DE CONTRÔLE À BASE
DE MICROCONTRÔLEUR POUR SYSTÈMES
PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES**

Date de soutenance : 20 juillet 1999



Devant le jury composé de :

Président :	Mr. N. BOUCENNA	M. C.	Université de Sétif
Rapporteurs :	Mr. F. KRIM	M. C.	Université de Sétif
	Mr. A. MALEK	C. R.	C. D. E. R. Alger
Examineurs :	Mr. K. BENMAHAMMED	Prof.	Université de Sétif
	Mr. N. KHANFER	M. C.	Université de Sétif
	Mr. A. KHELLAF	M. R.	C. D. E. R. Alger

Année 1998/1999

*A MES PARENTS
A MON EPOUSE
A MA FILLE NOUR- EL IMANE
A MON FILS M. AKRAM
A MES FRERES ET SŒURS*

Avant propos

Le présent travail entre dans le cadre de la Convention de Collaboration entre le Laboratoire Photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzaréah (Alger) et le Laboratoire d'Electronique de Puissance de l'Institut d'Electronique de l'Université Ferhat Abbas (Sétif).

*Ce travail a été effectué au Laboratoire Photovoltaïque (CDER) sous la direction scientifique du **Dr F. KRIM**, Maître de Conférence à l'Université de Sétif et du **Dr A. MALEK**, Chargé de Recherche et Chef du Laboratoire Photovoltaïque. Je tiens à leurs exprimer mes plus vifs remerciements et ma profonde et respectueuse reconnaissance par l'intérêt et la bienveillance avec lesquels ils ont dirigé mes recherches.*

*Je remercie **Dr M. BELHAMEL**, Maître de Recherche et Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables de m'avoir offert l'occasion d'effectuer des études de la Première Post-Graduation.*

*Mes remerciements vont au **Dr N. BOUCENNA**, Maître de Conférence à l'Institut d'Electronique de l'Université de Sétif, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.*

*Mes remerciements vont au **Dr K. BENMAHAMMED**, Professeur à l'Institut d'Electronique de l'Université de Sétif, au **Dr N. KHANFER**, Maître de Conférence à l'Institut d'Electronique de l'Université de Sétif et au **Dr A. KHELLAF**, Maître de Recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables, en acceptant de faire partie de ce jury d'examen pour ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier mon ami et collègue **A. CHOUDER**, Attaché de Recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables, pour son aide pendant la partie expérimentale.*

Je ne pourrai oublier de remercier mon épouse qui n'a jamais cessé de me soutenir moralement. Qu'elle trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

*Je remercie également mon frère **Abdelbaki**, pour son soutien moral pendant toute la durée de la préparation de ce diplôme de Magister.*

*Je remercie toutes les personnes avec lesquelles j'ai eu des échanges très bénéfiques sur le sujet, et plus particulièrement **S. LABED**, Attaché de Recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables.*

Que Toutes les personnes du Centre trouvent ici mes vifs remerciements pour leur concours qu'elles ont pu m'apporter.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
---------------------	----------

CHAPITRE I

STRATEGIES DE REGULATION ET DE CONTROLE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

1. Introduction	4
2. Système photovoltaïque	5
2.1. Générateur photovoltaïque	5
2.2. Stockage	9
2.3. Conditionnement de puissance	13
3. Stratégies de régulation et contrôle	15
3.1. Régulation à coupure	16
3.2. Régulation à coupure partielle	18
3.3. Régulation à modulation de largeur d'impulsion	19
3.4. Régulation à optimisation de puissance	21
4. Conclusion	22

CHAPITRE II

APPROCHE DE REGULATION ET DE CONTROLE DE L'ETAT DE CHARGE DE LA BATTERIE ETUDIEE

1. Introduction	23
2. Technique de régulation	26
2.1. Concept de la commande en un seul cycle	28
2.2. Théorie de la technique	29
2.3. Etude de simulation	34
3. Technique de contrôle de l'état de charge de la batterie	40
3.1. Modèle de la mesure coulombmétrique	41
3.2. Modèle de prédiction de la tension de circuit-ouvert	41
3.3. Algorithme général de contrôle de l'état de charge	44
4. Conclusion.	46

CHAPITRE III**IMPLEMENTATION MATERIELLE**

1. Introduction	47
2. Unité de régulation	48
2.1. Circuit de mesure et de conditionnement	49
2.2. Horloge	49
2.3. Intégrateur-resetter	50
2.4. Comparateur	50
2.5. Logique de commande	50
3. Unité de contrôle	51
3.1. Hardware	52
3.1.1. Module de base	53
3.1.2. Module d'acquisition	55
3.2. Software	56
3.2.1. Programme principal	57
3.2.2. Routine 'Start-PV'	58
3.2.3. Routine 'Update'	59
3.2.4. Routine 'Charge-discharge'	60
4. Conclusion	61

CHAPITRE IV**EXPERIMENTATION ET RESULTATS**

1. Introduction	62
2. Test de l'unité de régulation	63
2.1. Description du montage expérimental	63
2.2. Résultats et discussions	64
3. Test du dispositif sur banc d'essai	67
3.1 Description du banc d'essai	67
3.2 Résultats et discussions	71
4. Conclusion	73

CONCLUSION	74
-------------------	----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**ANNEXES**

INTRODUCTION

Bien que l'effet photovoltaïque avait été mis en évidence au milieu du XIX^{ème} siècle par Becquerel, l'application de l'énergie solaire par la conversion photovoltaïque est très récente. Elle remonte à l'ère spatiale, où les cellules solaires 'photopiles' s'imposèrent comme source d'alimentation électrique des satellites. S'agissant de l'application terrestre, l'essor de cette source n'a pris corps que progressivement pour se développer après la crise de l'énergie dans les années 70.

Depuis un certain temps, le monde moderne a pris conscience avec la crise du pétrole dans les années 70, qu'il faudrait recourir à d'autres sources de remplacement. A cet effet, l'énergie solaire photovoltaïque devient l'une des sources d'énergie la plus appropriée pour une production énergétique continue.

Actuellement, l'énergie solaire est devenue une réalité planétaire et il est certain que le XXI^{ème} siècle sera le siècle de la qualité et la protection de l'environnement. Dans cette optique, le photovoltaïque se présentera comme la seule alternative pour une production énergétique. Sans mouvement, fonctionnement sans bruit, sans apport de combustibles fossiles, les générateurs photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse provenant du soleil en électricité. Il constitue à cet effet un axe de recherche intéressant quant à sa maîtrise.

En fait , un système photovoltaïque est un système destiné à assurer les tâches suivantes : - convertir l'énergie solaire en une énergie électrique, - conditionner cette énergie en vue de l'adapter à des divers besoins. Les systèmes photovoltaïques peuvent se distinguer selon trois types: -systèmes autonomes, -systèmes hybrides ou mixtes, - systèmes interconnectés au réseau.

Le système photovoltaïque autonome connaît un succès dans le monde, vu sa capacité à couvrir la totalité de la demande énergétique. Il est muni d'un élément de stockage adéquat 'Batteries d'accumulateurs', pour subvenir aux besoins énergétiques pendant les horaires distincts de celles du soleil. Les principales applications sont les suivantes, telles que : l'électrification rurale en sites isolés, l'alimentation des relais de télécommunications, l'alimentation des installations de protection cathodique des pipelines pétroliers et gaziers, etc. A titre d'exemple, aujourd'hui la puissance photovoltaïque installée dans le monde dépasse les 500 MWc correspondants à plus ou moins la moitié de la puissance produite par une centrale nucléaire.

La batterie est le principal élément dans un système photovoltaïque autonome, par où transite l'énergie électrique fournie par le générateur. Toutefois, la batterie d'accumulateurs reste l'élément le plus fragile. Sa durée de vie est étroitement liée à la manière dont elle est chargée et déchargée. Une longévité raisonnable n'est atteinte que par une régulation et un contrôle rigoureux de l'état de charge et par une protection soignée contre les surcharges et les décharges profondes.

Les performances d'un système photovoltaïque autonome dépendent essentiellement de la technique de régulation et contrôle adoptée. En effet, plusieurs techniques de régulation ont été développées, se basant sur la tension mesurée aux bornes de la batterie comme étant le seul indicateur de son état de charge. Néanmoins ce paramètre est insuffisant, car plusieurs autres grandeurs influents interviennent dans le processus, telles que : le courant de charge, le courant de décharge, le régime de charge, de décharge, la température, l'auto-décharge, etc.

Pour ce cas, l'objet de notre travail porte sur une contribution au développement d'une nouvelle stratégie de régulation et contrôle de l'état de charge de la batterie dans un système photovoltaïque par la mise au point d'un dispositif électronique à base de microcontrôleur. Dans cette stratégie, la méthodologie optée est relative à une charge optimale de la batterie d'accumulateurs dans le système photovoltaïque et le contrôle automatique de son état de charge.

La liaison générateur-batterie est assurée par le biais d'un convertisseur continu-continu commandé de telle façon que le générateur fonctionne à son point de puissance maximale. La technique de commande développée est une technique de commande non linéaire appelée commande en seul cycle 'One Cycle Control - OCC'. Elle consiste à réguler la tension du générateur à une tension de référence correspondante à la tension de son point de puissance maximale, quelles que soient les fluctuations d'éclairement et de température.

Quant au contrôle de la charge et de la décharge, une technique nouvelle a été introduite, qui se base sur l'estimation de l'état de charge de la batterie, en utilisant la technique combinée de la mesure coulombmétrique 'Coulometric Measurements' ou plutôt la mesure des ampèreheures et de la tension de circuit-ouvert.

En vue de mettre en pratique cette stratégie de régulation et contrôle, un dispositif a été mis au point et expérimenté. Ce dispositif s'articule autour d'une architecture modulaire, qui se compose de deux unités principales :

- L'unité de régulation de type analogique, dans laquelle la technique de commande en seul cycle 'OCC' a été implémentée,

- L'unité de contrôle à base du microcontrôleur 8052 AH-BASIC dans lequel est implémentée à la fois la technique de l'estimation de l'état de charge 'SOC', et le contrôle des seuils de fin de charge et de décharge de la batterie.

Le chapitre I donne d'une manière générale le descriptif d'un système photovoltaïque autonome et les différents composants le constituant. Par ailleurs, les différentes stratégies de régulation et contrôle dans le système photovoltaïque couramment utilisées, avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Le chapitre II est consacré principalement à l'étude de développement de la nouvelle stratégie de régulation et contrôle de l'état de charge de la batterie. La simulation de cette technique de régulation a été menée à l'aide du logiciel Malab/SimulinkTM.

L'implémentation matérielle de ces deux techniques respectives est présentée dans le chapitre III, avec le fonctionnement du dispositif ainsi réalisé muni de son programme élaboré.

Enfin, une étude expérimentale sur banc d'essai est présentée dans le chapitre IV. Les résultats de cette expérimentation avec leur interprétation sont également présentés.

CHAPITRE I

STRATEGIES DE REGULATION ET DE CONTROLE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

1. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objet de donner une description générale d'un système photovoltaïque autonome, ainsi que les éléments essentiels qui le constituent.

Le cœur d'un système photovoltaïque est relatif à l'élément de régulation et de contrôle, qui consiste en l'adaptation de la puissance fournie par le générateur par une approche synthétique de diverses stratégies et de techniques de régulation et contrôle, pour le suivi du processus de la charge et de la décharge de l'élément de stockage 'batterie d'accumulateurs'.

Les performances de l'élément de stockage dépendent principalement de l'approche de régulation envisagée et choisie. Dans ce sens, les diverses techniques de régulation et de contrôle appropriées, évoquées dans la littérature, sont présentées dans ce chapitre, avec notamment leurs avantages et leurs inconvénients.

2. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Le système photovoltaïque autonome est un système énergétique utilisant la conversion de l'énergie solaire par l'effet photovoltaïque en une énergie électrique pour subvenir aux besoins de l'utilisation.

Généralement, le système photovoltaïque autonome se compose de trois principales parties (figure 1.1) :

- le générateur photovoltaïque,
- le stockage d'énergie,
- le conditionnement de puissance.

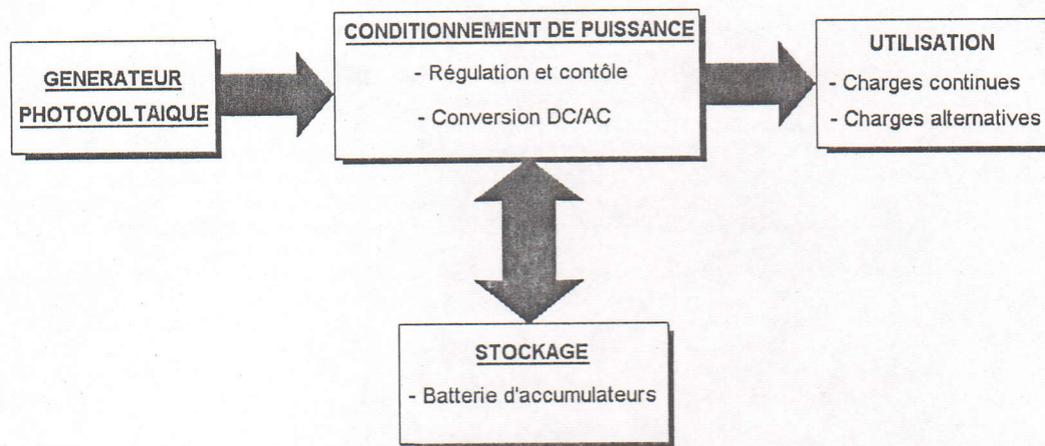


Figure 1.1 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque autonome

2.1. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque 'GPV' est constitué par l'assemblage de cellules élémentaires associées en module, lui-même associé en série / parallèle à plusieurs autres modules pour divers besoins en énergie électrique de l'utilisation.

La cellule photovoltaïque est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La cellule la plus répandue est composée à base de silicium monocristallin. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. Le processus de transformation du rayonnement solaire en électricité est appelé l'effet photovoltaïque.

2.1.1. Cellule solaire

La structure simple d'une cellule solaire est la jonction PN ou NP. En fonctionnement, la cellule solaire s'identifierait à un générateur de courant de lumière (I_{ph}) auquel il faut soustraire le courant de la diode en polarisation directe (I_D). En pratique, on introduit une résistance parallèle R_p qui rend compte de certains effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule et une résistance série R_s traduisant les phénomènes de contact (métallisation de grille et de face arrière) entre la couche de base et la zone avant de la cellule solaire.

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire est le suivant :

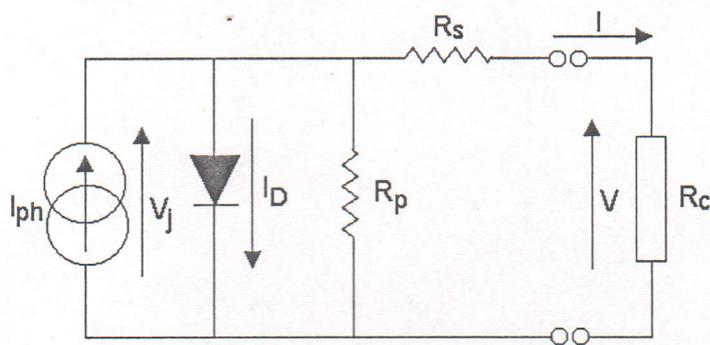


Figure 1.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

En fonctionnement sur charge, la caractéristique principale courant-tension (I-V) d'une cellule solaire est définie par l'équation suivante:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(e \frac{V + IR_s}{m k T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1.1)$$

où :

- I_{ph} : courant photogénéré ou photocourant (A),
- I_s : courant de saturation de la diode (A)
- k : constante de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$),
- e : charge de l'électron ($e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$),
- m : facteur d'idéalité de la diode ($m = 1 - 1.3$),
- T : température de fonctionnement de la jonction,
- R_s : résistance série,
- R_p : résistance parallèle.

Dans la pratique, l'équation précédente (1.1) peut être simplifier. Pour le cas d'une cellule solaire de bonne qualité ($m = 1$), on admet que :

- La résistance parallèle R_p a une valeur assez élevée. Donc le terme $(V + IR_s)/R_p \cong 0$.
- L'expression $\exp\left(e \frac{V + IR_s}{mkT}\right) \gg 1$
- En court-circuit ($V = 0, I = I_{cc}$), le courant photogénéré I_{ph} sera égal au courant de court-circuit I_{cc}

Par conséquent, l'équation courant-tension de la cellule s'écrit donc :

$$I = I_{cc} - I_s \exp\left(e \frac{V + IR_s}{mkT}\right) \quad (1.2)$$

Ou encore :

$$I = I_{cc} \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{oc} + IR_s}{V_t}\right) \right] \quad (1.3)$$

avec :

V_t : la tension thermique $V_t = \frac{kT}{e}$,

V_{oc} : la tension de circuit-ouvert.

La courbe caractéristique I-V présente un point extremum correspondant à la puissance maximale. La figure 1.3 représente les deux courbes caractérisant une cellule solaire, courant-tension I-V et puissance-tension P-V.

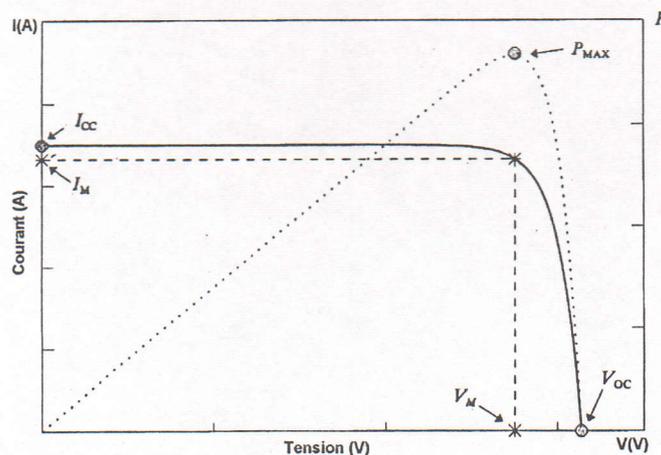


Figure 1.3 : Caractéristiques d'une cellule solaire

La température et l'éclairement solaire sont les paramètres les plus importants, d'autant plus que chacun des paramètres caractéristiques de la cellule solaire (I_{cc} , V_{oc} , ...) en dépendent (figure 1.4).

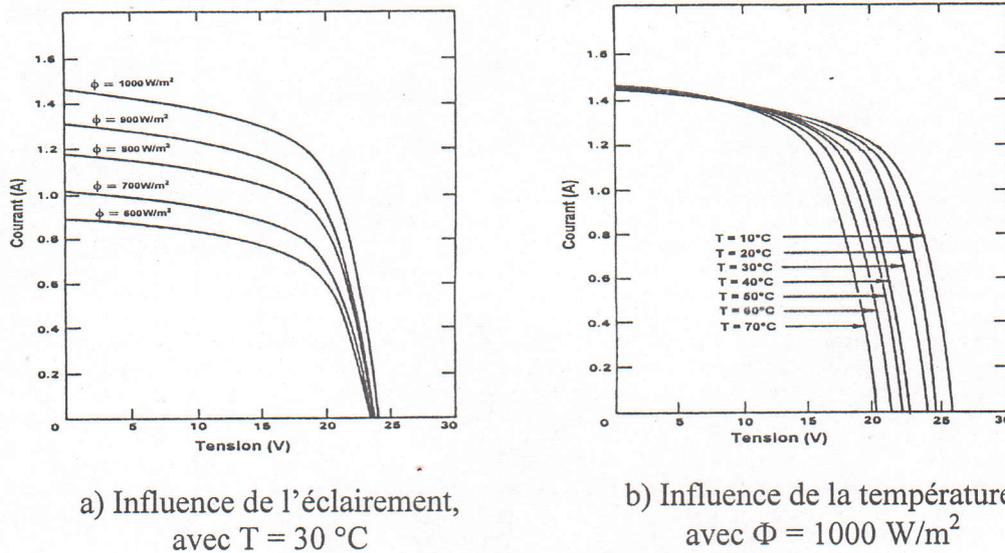


Figure 1.4 : Caractéristique I-V d'un module PV pour différents éclairements et températures

Les équations donnant la variation de la tension de circuit-ouvert V_{oc} et le courant de court-circuit I_{cc} en fonction de l'éclairement Φ (W/m^2) et de la température de jonction T ($^{\circ}\text{C}$) et par rapport aux conditions standards STC ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1000 W/m^2 , AM 1.5) sont les suivantes [1, 2]:

Le courant de court-circuit :

$$I_{cc} = \frac{I_{cc(\text{STC})} \Phi (\text{W/m}^2)}{1000\text{ W/m}^2} \tag{1.4}$$

La tension de circuit ouvert :

$$V_{oc} = V_{oc(\text{STC})} + \alpha(T - 25^{\circ}\text{C}) + V_t \ln \frac{\Phi (\text{W/m}^2)}{1000\text{ W/m}^2} \tag{1.5}$$

avec:

le coefficient α représente le facteur de correction de la tension de circuit-ouvert en fonction de la température. La valeur type de ce facteur est égale à $-2.3\text{ mV/}^{\circ}\text{C}$.

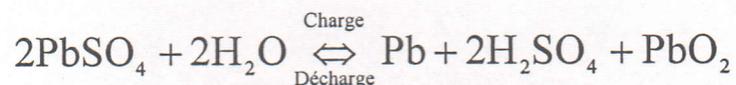
2.2. Stockage

Le caractère intermittent de l'énergie solaire reçue et l'irrégularité de la puissance requise imposent de mettre en réserve une certaine quantité d'énergie électrique pour une utilisation ultérieure. Parmi les procédés de stockage les plus adaptés aux systèmes photovoltaïques demeure le stockage électrochimique. Le stockage le plus approprié s'effectue par le biais d'éléments de batterie ou d'accumulateurs au plomb.

2.2.1. Accumulateur au plomb

L'élément d'accumulateurs au plomb-acide est constitué principalement d'un faisceau de plaques positives composées de bioxyde de plomb (PbO_2), d'un faisceau de plaques négatives à base de plomb spongieux (Pb), et baignant dans une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 .

Le principe de fonctionnement de l'accumulateur au plomb se résume dans la réaction réversible (ou double sulfatation) suivante :



Pendant la phase de décharge, la concentration en acide décroît, la force électromotrice de l'élément de batterie diminue, la résistance interne augmente. Par contre lors de la phase de charge, la solution se régénère, la réaction inverse se produit.

En fin de charge, un processus d'électrolyse de l'eau provoque un dégagement d'hydrogène accompagné de vapeurs d'acide.

Il existe différents types d'accumulateurs au plomb, mais tous présentent des caractéristiques communes. Les accumulateurs recommandés pour les systèmes photovoltaïques sont à usage flottant 'floating', car ils sont maintenus constamment en charge presque et ne subissent une forte décharge qu'occasionnellement. Elles sont conçues pour présenter une très faible auto-décharge.

L'utilisation d'un accumulateur est conditionnée par les caractéristiques principales dont la définition est donnée ci-dessous :

Capacité : C'est la quantité maximale d'énergie restituable par l'accumulateur ou plus pratiquement, le nombre d'ampère-heures que peut débiter un accumulateur pour un courant et une tension de fin de décharge définis.

La capacité est proportionnelle à la quantité de matière active mise en jeu. Elle varie selon le régime de charge et de décharge, et surtout de la température.

Tension d'utilisation : C'est la tension aux bornes d'un élément d'accumulateur à laquelle l'énergie est stockée et restituée normalement. Les limites de la tension de l'élément sont respectivement de 2.3-2.5 V pour la fin de charge et de 1.7-1.8 V pour la décharge, cela pour une température standard de 20 °C.

La figure 1.5 donne, à la température ambiante, la tension aux bornes d'un élément d'accumulateur de capacité 100 Ah en fonction des régimes de charge et de décharge.

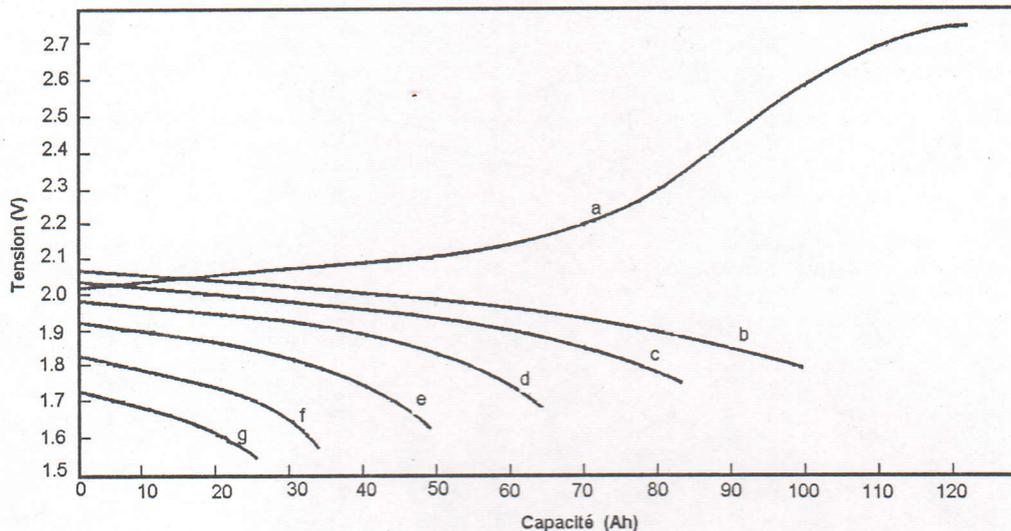


Figure 1.5 : Evolution de la tension en fonction du régime de charge et de décharge
 - b) c) d) e) f) g) - Décharge respectivement à 5, 20, 50, 100, 200, 300 A
 - a) - Charge à 6.7 A

Auto-décharge : L'auto-décharge représente la perte de capacité, donc d'énergie en laissant l'élément de batterie au repos (sans charge) pendant un temps donné. Elle est due à la présence de systèmes parasites, qui s'ajoutent au système électrochimique de base.

L'auto-décharge croît :

- avec le vieillissement naturel de l'accumulateur,
- à la suite d'erreurs de manipulation (décharge trop profonde avec inversion de polarité, recharge à l'envers,..)
- à la suite de la rareté de l'entretien, d'une concentration d'acide non conforme,
- en fonction de la température,
- avec l'adjonction d'eau non distillée.

L'auto-décharge est trop variable, mais la valeur type s'échelonne entre 2 et 3 % par mois.

Durée de vie : La durée de vie d'un élément d'accumulateur est le nombre de cycles de charge et de décharge. Le rôle de la batterie est de pouvoir être chargée, et puis déchargée un certain nombre de fois, avant que ses caractéristiques se détériorent. Elle peut s'exprimer en année ou en nombre de cycles.

Rendement : On distingue deux rendements :

- Le rendement en quantité d'électricité (ou rendement faradique): C'est le rapport entre le nombre d'ampères-heures fournis par un accumulateur et celui qu'il faut restituer pour la remise à l'état initial de l'élément. Ce rendement varie pratiquement de 0.7 à 0.95 suivant le type de la batterie.

- Le rendement énergétique : C'est le rapport entre l'énergie électrique exprimée en wattheures restituée et l'énergie électrique fournie. Il est toujours inférieur au rendement faradique et varie suivant les types de batterie entre 0.45 et 0.8.

2.2.2. Informations sur l'état de charge de l'accumulateur

Deux paramètres permettent la connaissance de l'état de charge d'un élément d'accumulateur :

Densité d'électrolyte : C'est le rapport entre la masse d'une quantité donnée d'électrolyte et la masse d'une même quantité d'eau.

La densité varie selon le régime de charge ou de décharge. Lors de décharge la concentration de l'acide décroît et lors de la charge elle croît.

La densité dépend de la température ambiante. Le facteur correctif à prendre en considération est le suivant :

$$d_{T^{\circ}} = d_{20^{\circ}\text{C}} [1 + K_T (20 - T)] \quad (1.6)$$

où

K_T : facteur de correction. La valeur type de ce facteur est de 0.007 kg/l/°C

La densité de l'électrolyte est l'indicateur approprié pour la connaissance de l'état de charge. Mais il s'avère non utile sur le plan pratique, car sa valeur caractéristique n'apparaît qu'après un certain temps.

Tension aux bornes de l'accumulateur : La tension aux bornes de l'accumulateur est donnée par l'expression suivante :

$$V_b = V_{oc} \pm r I_b \quad (1.7)$$

où

r : la résistance interne. Elle dépend essentiellement du courant de charge ou de décharge, de la température, de l'état de charge etc.

V_{oc} : la tension de circuit-ouvert de l'élément. Elle varie légèrement avec la température.

De nombreux modèles décrivant la tension aux bornes de la batterie sont rapportés dans la littérature [3, 4, 5]. Ils tiennent compte de l'influence des principaux paramètres cités ci-dessus. A titre d'exemple, nous donnons le modèle [6], exprimant la tension de charge et de décharge par les deux expressions semi-empiriques suivantes :

Pendant la décharge :

$$V_d = 2.094[1 - 0.001(T - 298)] - \frac{I}{Q_d} \left[\frac{0.189}{SOC} + 0.15(1 - 0.02(T - 298)) \right] \quad (1.8)$$

Pendant la charge :

$$V_c = 2.094[1 - 0.001(T - 298)] + \frac{I}{Q_c} \left[\frac{0.189}{1.142 - SOC} + 0.15(1 - 0.02(T - 298)) \right] + (SOC - 0.9) \ln \left(\frac{300I}{Q_c} + 1 \right) \quad (1.9)$$

où

Q_d, Q_c : sont les quantités d'électricité (exprimée en Ampère-heures) respectivement restituée et reçue pendant un à une température donnée.

SOC : l'état de charge de la batterie (State of Charge). Il représente le rapport entre la quantité d'électricité reçue ou restituée et la capacité maximale.

Le troisième terme de l'équation (1.9) n'est inclus qu'au moment où la tension est supérieure à 2.28V.

L'influence de quelques paramètres caractéristiques sur la tension de la batterie sont présentés sur les figures 1.6 à 1.9 [7].

A un état de charge donné, la tension de la batterie décroît lorsque la température de l'électrolyte augmente (figure 1.6).

Pour un régime de charge (courant de charge) donné, on remarque la décroissance de la tension de la batterie en fonction de l'augmentation de la température de l'électrolyte (figure 1.7).

Tandis que sur la figure 1.8, la tension de la batterie décroît d'une façon linéaire en fonction de la température de l'électrolyte. Le coefficient de variation est égal 0.04 V/°C.

Sur la figure 1.9, on note que si le régime de charge est faible, la tension de la batterie atteint rapidement sa valeur de fin de charge, compte tenu de son état de charge.

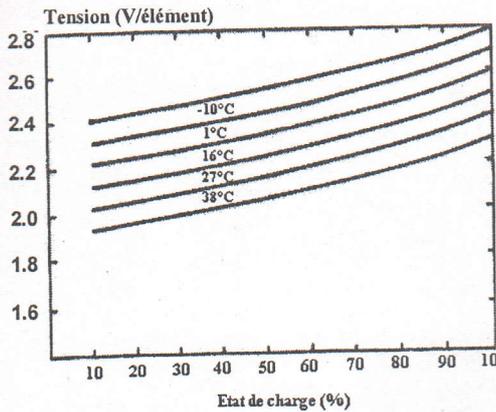


Figure 1.6 : Tension de la batterie pour différents états de charge et de températures

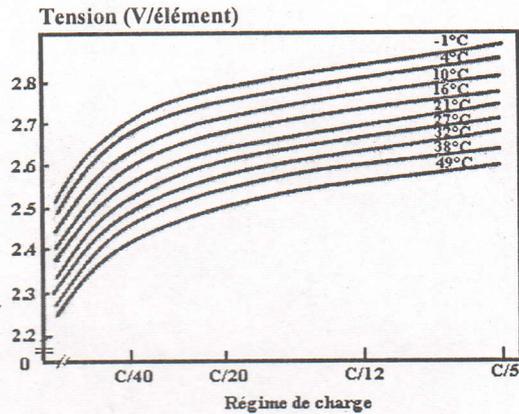


Figure 1.7 : Tension de la batterie pour différents régimes de charge et de températures

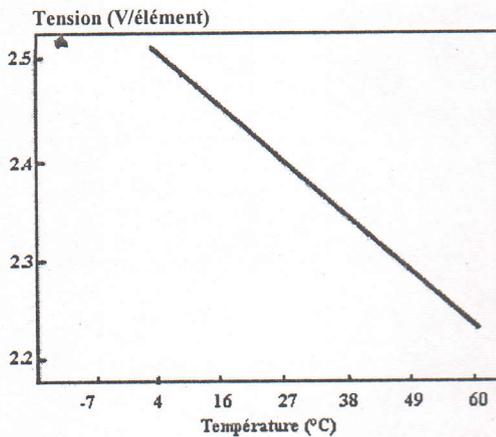


Figure 1.8 : Tension de la batterie pour différentes températures

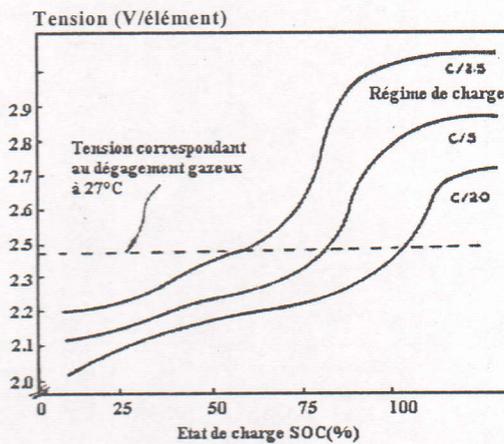


Figure 1.9 : Tension de la batterie pour différents états de charge

2.3. Conditionnement de la puissance

Suivant la nature du système photovoltaïque, le conditionnement de puissance 'SCP' permet d'assurer de fonctions multiples, telles que :

- La régulation et le contrôle de l'état de charge de la batterie d'accumulateurs: deux procédés peuvent être envisagés :
 - les régulations en courant et en tension, le contrôle de la charge et de la décharge de la batterie d'accumulateurs,
 - le couplage optimal entre le générateur photovoltaïque et la batterie d'accumulateurs avec le contrôle de charge et de décharge.
- La conversion de l'énergie électrique continue en alternative (DC/AC).

2.3.1. Régulation et contrôle

Si l'on considère que l'ensemble des éléments mis en jeu dans un système photovoltaïque, soient directement couplés (en absence d'un dispositif de régulation et de contrôle) (figure 1.10), plusieurs cas de fonctionnement peuvent se présenter :

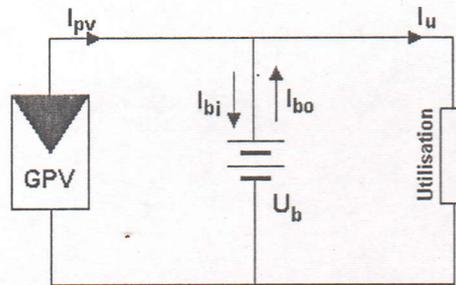


Figure 1.10 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque sans le dispositif de régulation et de contrôle

- Si l'éclairement est suffisamment abondant, $I_{pv} > I_u$, la batterie et l'utilisation sont alimentés simultanément. La tension de la batterie a tendance à augmenter.
- En cas d'égalité entre le courant I_{pv} et le courant d'utilisation I_u , la batterie n'est pas sollicitée, et l'utilisation est directement alimentée par le générateur.
- Si l'éclairement est suffisamment faible, $I_{pv} < I_u$, l'utilisation est alimentée à la fois par la batterie et le générateur.
- Si le courant du générateur est nul, $I_{pv} = 0$ (générateur à l'obscurité), la batterie est alors sollicitée par l'utilisation.

En faisant une analyse de ces comportements, plusieurs remarques peuvent être alors notées :

- La batterie ne doit pas être utilisée au dehors des limites de charge et de décharge définies. Par conséquent la prévision d'organes d'information protégeant la batterie est largement recommandée (éléments de coupure commandés par une technique de commande adéquate).
- Dans le cas où le générateur est à l'obscurité, la batterie peut débiter dans le générateur, si la tension de la batterie est supérieure à la tension de circuit-ouvert du générateur. Le générateur devient récepteur et risque une altération de cet élément. Il est indispensable d'intercaler un élément qui s'oppose à cet effet (diodes anti-retour).

2.3.2. Conversion continue/alternative

Les charges à courant alternatif nécessitent un convertisseur continu/alternatif (DC/AC) adapté à leurs caractéristiques. Ce convertisseur transforme en énergie électrique alternative, une énergie de type continu provenant soit de la batterie d'accumulateurs, soit directement du générateur photovoltaïque via le dispositif de régulation et de contrôle.

Le convertisseur DC/AC est appelé couramment 'onduleur'. C'est un dispositif électronique utilisant les composants de puissance tels que les MOSFET, BJT, IGBT etc. Il doit délivrer un signal le plus proche possible du signal sinusoïdal et avec une fréquence fixe. En effet pour les fonctionnements de la plupart des charges, la présence de certains harmoniques est néfaste. A cet effet toute approche de commande doit prendre en compte les contraintes suivantes :

- La distorsion harmonique en régime permanent doit être rigoureusement minimisée,
- Le terme fondamental de la tension de sortie doit être réglé à une valeur de référence.

3. STRATEGIES DE REGULATION ET DE CONTROLE

De nombreux travaux relatifs aux techniques de régulation et contrôle dans un système photovoltaïque autonome sont rapportés dans la littérature [8-17]. La plupart de ces techniques s'appuient sur la tension mesurée aux bornes de la batterie d'accumulateurs comme étant le seul indicateur de l'état de charge de la batterie.

Les principales stratégies de régulation et de contrôle, qui sont les plus utilisées dans les systèmes photovoltaïques, sont les suivantes :

- Stratégie 1 : Régulation à coupure 'On/Off regulation'
- Stratégie 2 : Régulation à coupure partielle 'Multistep regulation'
- Stratégie 3 : Régulation à modulation de largeur d'impulsion 'Chopper regulation'
- Stratégie 4 : Régulation à couplage optimal 'MPPT regulation'

3. 1. Régulation à coupure 'On/Off regulation'

Ce type de technique consiste en la commande 'tout ou rien' de deux interrupteurs 'SW1' et 'SW2', qui assurent le couplage direct respectivement entre le générateur PV et la batterie d'une part et entre la batterie et l'utilisation d'autre part. [8, 9, 10]

Deux possibilités de connexion générateur-batterie peuvent être réalisées. L'interrupteur 'SW1' est monté soit en série soit en parallèle, comme le montre la figure 1.10.

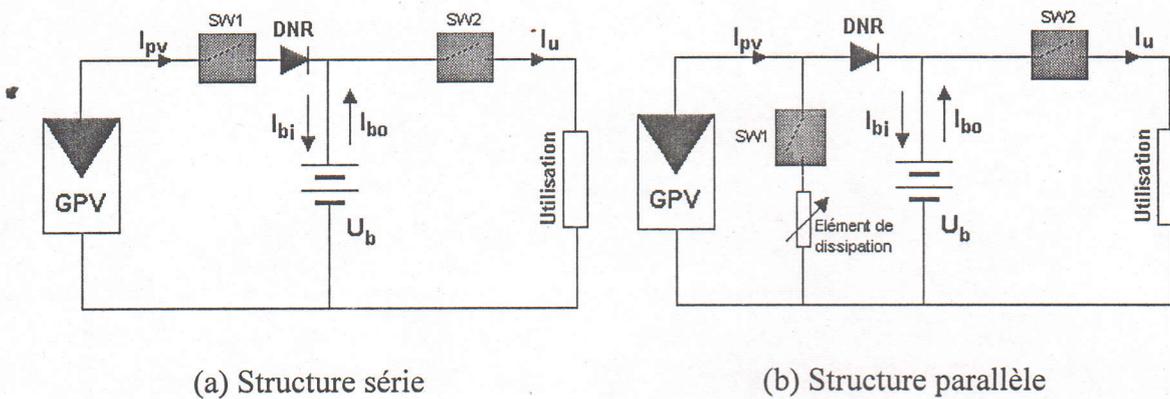


Figure 1.10 : Structures du dispositif de régulation à coupure

Le principe de fonctionnement d'un tel dispositif de régulation se base sur les deux cycles d'hysteresis correspondants aux processus de charge et de décharge (figure 1.11).

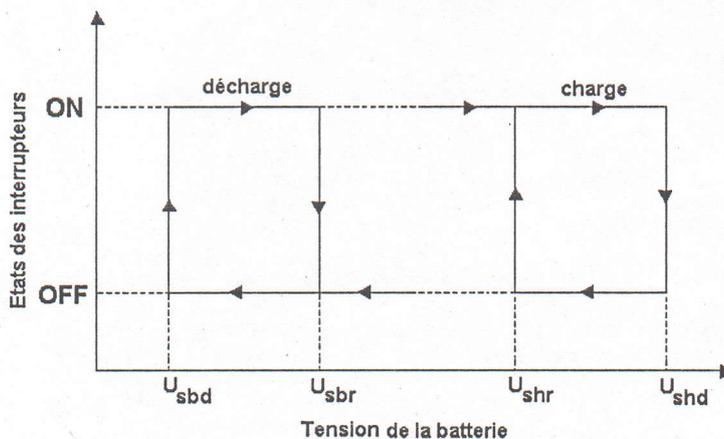


Figure 1.11 : Cycles d'hysteresis de charge et de décharge

Processus de charge : Lors de la charge, l'interrupteur 'SW1' est à l'état fermé (On) grâce à un niveau logique 1 émis par le circuit de commande. La connexion générateur-batterie est donc établie. Le GPV débite à plein courant et sans interruption. Le dispositif de régulation mesure donc en permanence la tension aux bornes de la batterie. Lorsque cette dernière atteint la valeur du seuil haut U_{shd} (tension de fin de charge ou de tension de seuil haut de déconnexion). Et afin de protéger la batterie contre les surcharges, l'interrupteur 'SW1' s'ouvre (Off) grâce à un niveau logique 0, permettant la déconnexion du générateur PV de la batterie. La liaison générateur-batterie ne se rétablit que lorsque la tension serait inférieure ou égale à la valeur du seuil haut U_{shr} (tension de seuil haut de reconnexion).

Processus de décharge : Lors de la phase de décharge, l'interrupteur 'SW2' se ferme (On) grâce au niveau logique 1, la batterie restitue continuellement l'énergie stockée à l'utilisation tant que l'énergie fournie par le GPV est faible. Afin d'éviter que la batterie ne se décharge profondément, c'est-à-dire dans le cas où la tension est en dessous du seuil de décharge U_{sbd} (tension de décharge ou tension de seuil bas de déconnexion), le dispositif interrompt la liaison batterie-utilisation en mettant l'interrupteur 'SW2' à l'état ouvert (Off) et permet à nouveau la reconnexion de l'utilisation quand la tension atteint la valeur du seuil bas de reconnexion U_{sbr} .

En analysant les profils de la tension et du courant de charge, illustrés dans la figure 1.12, nous pouvons noter que lorsque la tension de la batterie atteint son seuil de fin de charge, le générateur PV est déconnecté, annulant brusquement le courant. Et à cet effet, la tension a tendance à chuter. Cette chute se traduit par une charge inadéquate (faible concentration de l'électrolyte).

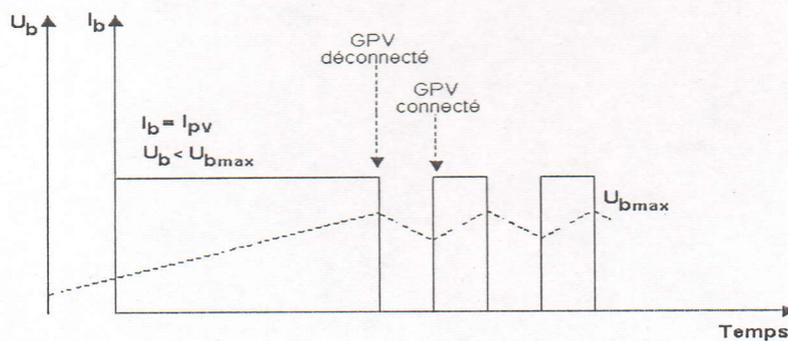


Figure 1.12 : Profils de la tension et du courant de charge

Les avantages de cette stratégie de régulation sont les suivants :

- consommation propre faible tant que la batterie n'est pas chargée,
- simplicité d'implémentation de cette technique autour de circuits analogiques.

Par contre, cette stratégie présente également des inconvénients :

- une adéquation dans la charge de la batterie due à la coupure brusque du courant de charge,
- une nécessité d'ajouter des éléments de puissance pour la dissipation de l'énergie excédentaire (cas de la structure parallèle), limitant ainsi son utilisation aux systèmes PV de faible puissance.
- une mauvaise adaptation entre le générateur PV et la batterie.

3. 2. Régulation à coupure partielle 'Multistep regulation'

En vue de poursuivre une fin de charge complète de la batterie avec une intensité de courant décroissante, la régulation à coupure partielle a été mise au point à cet effet en permettant d'approcher la pleine charge de la batterie. [8 - 11]

Le principe de cette technique consiste donc à fractionner le générateur PV en plusieurs branches identiques associées en parallèle et connectées à la batterie via des interrupteurs montés en cascade (figure 1.13).

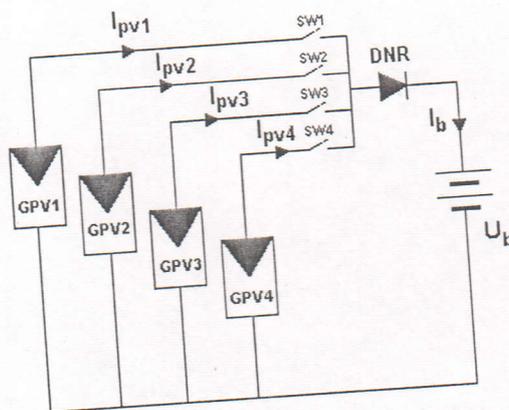


Figure 1.13 : Topologie du dispositif de régulation à coupure partielle

Le fonctionnement de chacun de ces interrupteurs se fait suivant un cycle d'hystérésis préalablement défini, permettant ainsi la déconnexion ou la connexion graduelle du générateur PV, tenant compte de l'état de charge de la batterie.

La figure 1.14 représente les profils de la tension et du courant de charge de la batterie connectée à un générateur PV constitué de quatre branches en parallèle. En début de charge, le générateur PV en entier débite. En phase de fin de charge, le courant commence à décroître par palier et ce, par la déconnexion graduelle des branches du GPV successivement, jusqu'à l'annulation du courant.

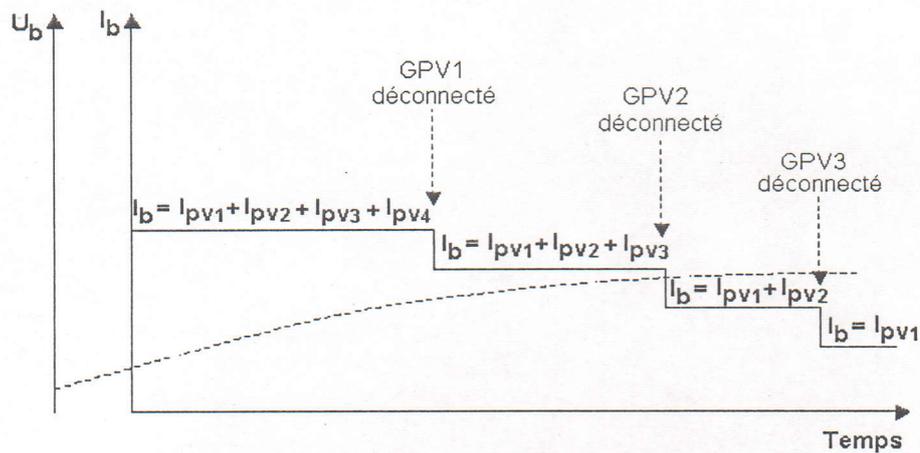


Figure 1.14 : Profils de la tension et du courant de charge

Quant au processus de décharge, il s'effectue de la même manière, en gardant le même procédé qu'en régulation à coupure décrite précédemment.

La stratégie de régulation à coupure partielle présente deux avantages :

- simplicité d'implémentation autour de circuits analogiques,
- consommation propre faible tant que la batterie n'est chargée,

Néanmoins, une telle stratégie de régulation présente plusieurs inconvénients :

- utilisation limitée aux systèmes photovoltaïques de grande puissance,
- présence de plusieurs éléments de coupure (relais électromagnétiques) rendant le système encombrant et plus onéreux.

3. 3. Régulation à modulation de largeur d'impulsion 'Chopper regulation'

Dans le cas de la stratégie de régulation à modulation de largeur d'impulsion 'PWM', la phase de fin de charge de la batterie se fait avec une intensité de courant réduite et continue pour une approche permettant une charge idéale de la batterie. [11 - 13]

Son principe de fonctionnement se base sur la commande 'PWM' d'un convertisseur DC/DC de type parallèle intercalé entre le générateur et la batterie.

Le schéma de principe d'un tel dispositif est représenté en figure 1.15.

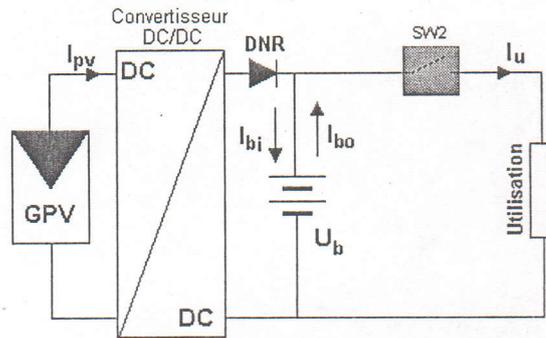


Figure 1.15 : Topologie du dispositif de régulation à modulation de largeur d’impulsion

En début de charge, le convertisseur DC/DC n’est pas en fonctionnement, la liaison générateur-batterie est assurée par le biais d’un élément de coupure fonctionnant en tout ou rien (relais électromagnétique par exemple). Le courant entrant dans la batterie est égal au courant délivré par le générateur PV (figure 1.16). Lorsque la tension de la batterie atteint la valeur de 2.28 V/élément, le relais coupe la liaison directe générateur-batterie, et le convertisseur DC/DC entre en fonctionnement; ce dernier est asservi pour délivrer à la batterie sa tension de floating et un courant décroissant .

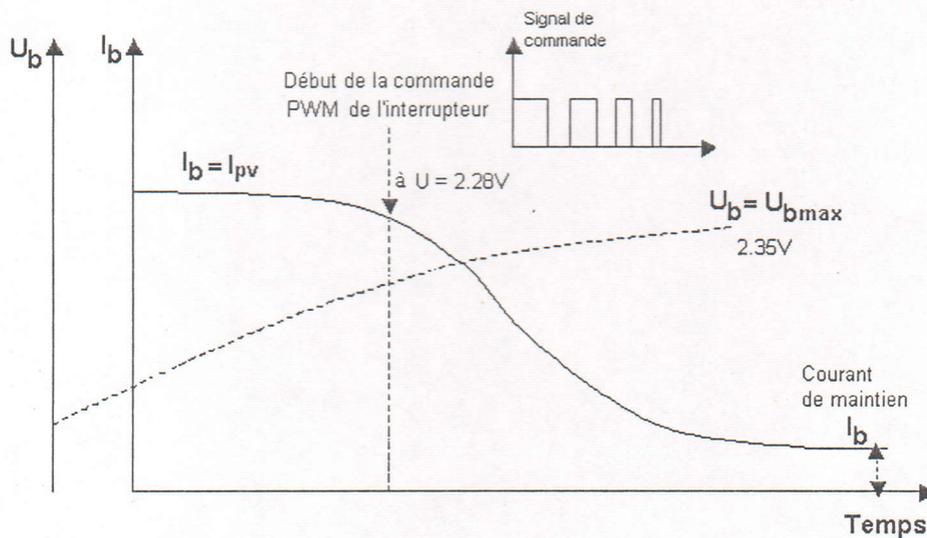


Figure 1.16 : Profils idéaux de la tension et du courant de charge

Le signal de commande ‘PWM’ est obtenu en comparant un signal en dent de scie avec un signal continu, qui est l’image de la tension de la batterie. Ce signal PWM présente un rapport cyclique variable, dont les impulsions sont larges au début puis deviennent étroites au fur et à mesure que la tension de la batterie augmente.



L'interrupteur 'SW2' est un relais électromagnétique destiné à assurer le processus de décharge selon un cycle d'hystérésis prédéfini.

3. 4. Régulation à optimisation de puissance 'MPPT regulation'

Contrairement aux stratégies de régulation décrites précédemment, la technique à optimisation de puissance permet la gestion au mieux l'énergie disponible à la sortie du générateur photovoltaïque. Ce type de régulation assure une fonction d'adaptation d'impédance, en transférant la puissance électrique maximale issue du générateur PV à la batterie, quelles que soient les variations d'éclairement et de température. [7, 14 - 16]

Son principe est basé sur l'adjonction d'un dispositif électronique, qui consiste en la poursuite du point de puissance maximale du générateur, appelée couramment MPPT 'Maximum Power Point Tracking'. Ce dispositif est un convertisseur DC/DC de type série ou parallèle (figure 1.17) commandé par des algorithmes de recherche du point de puissance maximale.

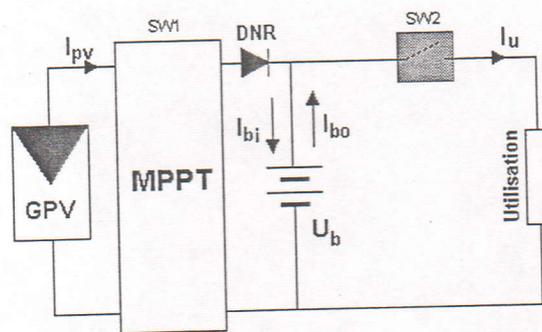


Figure 1.17 : Topologie du dispositif de régulation à couplage optimal 'MPPT'

Plusieurs méthodes de recherche du point de puissance ont été développées à cet effet, à savoir : [17 - 22]

Recherche extrême : Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance P-V du générateur photovoltaïque. Le point de puissance maximale 'PPM' est obtenu en effectuant l'étude de signe du gradient de la puissance dP/dV . La valeur de la pente donne alors une information précise sur la position du point de fonctionnement par rapport au point maximum.

Deux cas sont à distinguer :

- dP/dV est positif; dans ce cas le point de fonctionnement se trouve à gauche du 'PPM', alors il faudrait augmenter la tension pour s'approcher de ce point 'PPM'
- dP/dV est négatif; le point de fonctionnement se trouve donc à droite du 'PPM', alors il faudrait diminuer la tension pour s'approcher du PPM

Recherche utilisant une cellule pilote : Elle consiste à considérer le générateur comme un dipôle de caractère général. On mesure la tension de circuit-ouvert de la cellule solaire témoin similaire à celles constituant le générateur photovoltaïque, comme valeur de consigne. En effet, la tension optimale du générateur est proportionnelle à la tension de la cellule. Pour chacune des mesures, on effectue un asservissement de la tension du générateur à la valeur de consigne.

Recherche microprogrammée : Cette méthode consiste au stockage dans la mémoire d'un microprocesseur des différents points de puissance maximale du générateur photovoltaïque, pour différents éclaircissements et de températures.

La recherche du point de fonctionnement est réalisée par la comparaison du courant mesuré avec la valeur précédemment stockée, selon la procédure suivante :

- On établit une tension de fonctionnement asservie à une tension de consigne,
- On mesure le courant délivré par le générateur
- On le compare avec le courant mémorisé correspondant à la tension de consigne,
- En fonction de la différence obtenue, une nouvelle consigne est fixée,
- On recommence la procédure jusqu'à l'obtention de l'égalité entre les deux courants.

Une procédure algorithmique adéquate peut assurer une convergence rapide vers le point optimal.

4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les stratégies de régulation et contrôle le plus utilisées dans le système photovoltaïque pour le conditionnement de la puissance. La plupart de ces stratégies s'appuient sur la mesure de la tension aux bornes de la batterie, comme étant le seul paramètre de contrôle de l'état de charge de cette dernière. Toutefois la batterie possède d'autres paramètres influents, dont il faut prendre en considération. Pour ces raisons, ces stratégies s'avèrent incomplètes, donc non fiables.

Une alternative de régulation et contrôle a été proposée, se basant sur la régulation de la tension de la batterie à la tension optimale du générateur photovoltaïque pour un meilleur couplage générateur-batterie, et sur le contrôle intelligent de l'état de charge de la batterie, qui fera l'objet du chapitre suivant.

APPROCHE DE REGULATION ET DE CONTROLE DE L'ETAT DE CHARGE ETUDIEE

1. INTRODUCTION

La batterie utilisée en photovoltaïque est un système électrochimique dynamique. Pour une connaissance appropriée de l'état de charge de ce système, la description de son comportement reste néanmoins assez difficile pour en assurer une maîtrise parfaite de la régulation et du contrôle de son état de charge.

Généralement, dans la plupart des références bibliographiques, les auteurs recommandent la régulation et contrôle en tension de l'état de charge de la batterie 'State of Charge - SOC', sur le plan pratique.

Toutefois, cette technique mentionnée ci-dessus n'est pas suffisamment concluante, car plusieurs paramètres interviennent dans l'estimation de l'état de charge d'une batterie, à savoir : le courant de charge et de décharge, le régime de charge et de décharge, la densité de l'électrolyte, la température, la résistance interne, l'auto-décharge, l'âge, etc [7].

En théorie, pour une régulation et un contrôle fin de l'état de charge de la batterie dans un système photovoltaïque, la densité de l'électrolyte reste toutefois un excellent indicateur du SOC. Mais souvent, ce dernier présentera une valeur caractéristique qu'un certain temps après la charge, car une homogénéisation de l'électrolyte par une agitation s'impose pour effectuer une mesure précise, tandis que par ailleurs l'automatisation de cette donnée reste difficile.

Pour une meilleure indication de l'état de charge d'une batterie, il faudrait adjoindre un ampère-heure mètre qui mesure directement les quantités d'énergie électrique y entrant et en sortant [4, 10] Cette technique est appelée la mesure coulombmétrique. Celle-ci effectue l'établissement d'un bilan d'énergie autour de la batterie à chaque instant, tout en tenant compte de la consommation de la charge et de l'énergie ou de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

La figure 2.1 donne le schéma synoptique du cheminement des courants dans le système photovoltaïque. Tandis que, sur le tableau 2.1, sont montrés les divers cas possibles de fonctionnement de ce système.

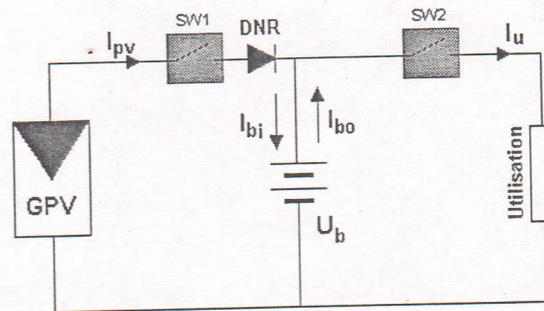


Figure 2.1: Schéma synoptique de la distribution de l'énergie électrique

Cas Possibles	Courant Entrée / Sortie
$I_{pv} > I_c$	$I_{bi} = I_{pv} - I_u$ $I_{bo} = 0$
$I_{pv} = I_c$	$I_{bi} = I_{bo} = 0$
$I_{pv} < I_c$	$I_{bi} = 0$ $I_{bo} = I_u - I_{pv}$
$I_{pv} = 0$	$I_{bi} = 0$ $I_{bo} = I_u$

Tableau 2.1 : Divers cas possibles de distribution énergétique

L'état de charge ou le SOC de la batterie est calculé en utilisant la relation suivante :

$$SOC = SOC_0 \pm \frac{Q}{C} \tag{2.1}$$

où :

- SOC_0 : Etat de charge initial,
- C : Capacité nominale de la batterie,

- Q : Quantité d'électricité de charge ou de décharge.
Elle est donnée par l'expression : $Q = I t$ avec $I = I_{bi}$ ou I_{bo} et t le temps de charge ou de décharge.

Le système idéal de régulation et de contrôle devrait donc assurer des fonctions multiples. Parmi ces fonctions, il y a entre autres :

- Un transfert optimal de l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque, durant la charge complète de la batterie. Cette fonction nécessite la poursuite en temps réel du point de puissance maximale 'PPM' de ce générateur. Cette dernière est désignée par le terme MPPT (Maximum Power Point Tracking).
- Un contrôle minutieux de l'état de charge de la batterie 'SOC' pour la protection de la batterie contre des décharges excessives (cas où le $SOC < SOC_{min}$) et contre des profondes surcharges (dans le cas où le $SOC > SOC_{max}$), tout en tenant compte de l'ensemble des paramètres indicateurs de l'état de charge.

L'approche de la régulation et du contrôle proposée porte sur l'exploitation optimale de la puissance fournie du générateur photovoltaïque pour la charge de la batterie, ainsi que l'estimation de la quantité d'électricité (ampères-heures) emmagasinée et/ou restituée par la batterie.

En effet, le dispositif électronique de régulation et de contrôle se compose précisément de deux parties principales désignées par :

- une unité de régulation (MPPT),
- une unité de contrôle de l'état de charge.

La figure 2.2 présente le schéma synoptique de ce dispositif électronique de régulation et de contrôle incorporé dans un système photovoltaïque.

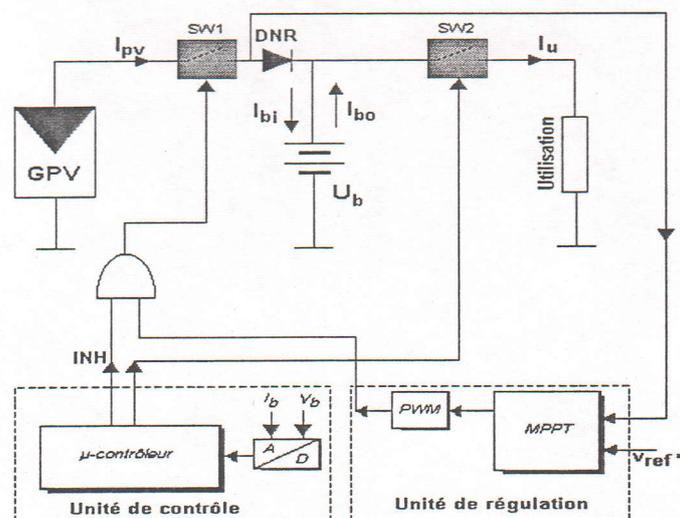


Figure 2.2 : Schéma synoptique du dispositif électronique de régulation et de contrôle dans un système photovoltaïque

Le principe de fonctionnement du dispositif réside dans la commande des deux interrupteurs 'SW1' et 'SW2' respectivement en fermeture et/ou en ouverture.

L'unité de régulation consiste en la poursuite du point de puissance optimale du générateur PV. Ceci peut s'effectuer moyennant une technique de commande adéquate qui permet de générer un signal de commande à l'interrupteur 'SW1' et ce afin d'assurer une charge optimale de la batterie.

Le rôle de l'unité de contrôle est le calcul numérique du 'SOC' à l'aide d'un microcontrôleur, qui reçoit à son tour la valeur du courant d'entrée ou de sortie de la batterie via un convertisseur analogique numérique, et selon l'état de charge ainsi calculé, génère des signaux de commande, soit pour inhiber la fonction MPPT en cas du $SOC > SOC_{max}$ par déconnexion du GPV, soit pour délester la charge en cas du $SOC < SOC_{min}$

Généralement, le processus de charge est assuré à travers un convertisseur DC/DC 'SW1' et le processus de décharge à travers un élément travaillant en tout ou rien (relais).

2. TECHNIQUE DE REGULATION

L'unité de régulation permet d'optimiser l'énergie issue du générateur photovoltaïque -GPV pour charger la batterie. Le système servant d'interface entre le générateur -GPV et la batterie de stockage est un convertisseur DC/DC commandé en fermeture et en ouverture (on / off), afin que le fonctionnement (charge de batterie) s'effectue au point de puissance maximale (PPM) du générateur -GPV, quelle que soit les perturbations climatologiques (éclairage et température).

Plusieurs approches de recherche du PPM sont rapportées dans la littérature [17-22], entre autres :

- la recherche extrême,
- la recherche micro-programmée,
- la recherche utilisant une cellule pilote.

Notre étude se limitera à cette dernière approche, car plusieurs facteurs sont à leur avantage, citons par exemple, la simplicité, la stabilité etc.

Cette approche consiste à considérer le générateur photovoltaïque -GPV comme un dipôle de caractère aléatoire. La recherche du point de puissance maximale -PPM est effectuée en utilisant une cellule pilote mesurant la tension de circuit-ouvert comme étant tension de référence et moyennant une technique de commande adéquate, on doit asservir la tension du GPV à la tension de référence correspondant à la tension du PPM.

Il a été vérifié expérimentalement que la tension optimale V_{MP} du PPM du générateur photovoltaïque est une fonction linéaire de sa tension de circuit-ouvert V_{oc} , quelques soient les perturbations d'éclairement et de température (figure 2.2) [23]. A cet effet, pour optimiser le fonctionnement du GPV et par conséquent assurer le transfert optimal de l'énergie à la batterie lors de la phase de charge, la méthode la plus simple pour la recherche du PPM consiste à asservir la tension du générateur PV à une tension de référence. L'obtention de cette tension de référence s'effectue en mesurant la tension en circuit-ouvert d'une cellule solaire (cellule pilote) identique à celles qui constituent le générateur photovoltaïque. Pour chaque mesure, une valeur de la tension optimale V_{MP} est calculée en utilisant la relation suivante :

$$V_{MP} = C_v V_{oc} \quad (\text{cellule pilote}) \quad (2.2)$$

où C_v est une constante.

La tension optimale est de l'ordre de 80 % de la tension du circuit-ouvert pour un éclairement et une température typiques. Donc, la valeur optimale de la constante C_v est approximativement égale à 80 % du nombre de cellules associées en série dans le générateur PV.

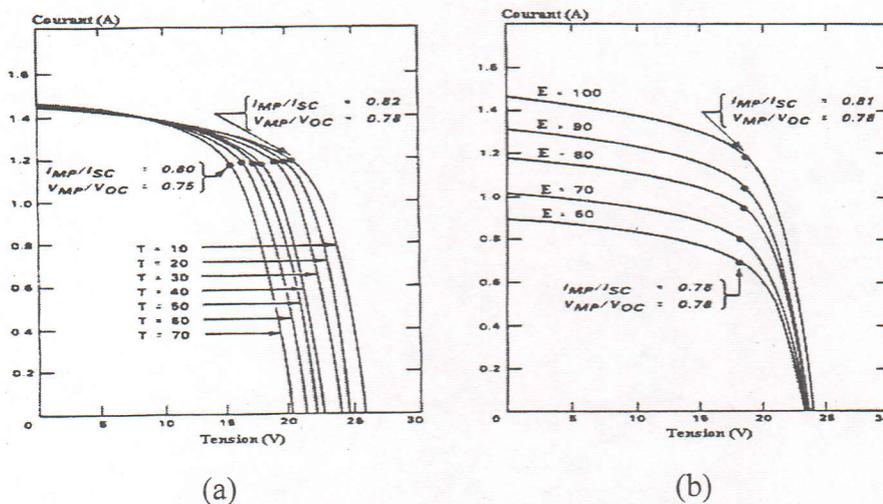


Figure 2.2 : Courbes I-V d'un module photovoltaïque [23]
 (a) Eclairement constant ($E = 1000 \text{ W/m}^2$), température variable
 (b) Eclairement variable et température constante ($T = 30$ °C)

Les performances d'un tel système dépendent essentiellement de la technique de commande utilisée parmi de nombreuses autres techniques existantes. Dans la présente étude, une nouvelle technique de commande non linéaire 'One Cycle Control' [24 - 26] a été exploitée pour la commande de notre système de régulation (Maximum Power Point Tracking- MPPT). Cette technique s'appuie principalement sur le contrôle non linéaire du rapport cyclique du convertisseur, afin d'asservir le système à une tension de référence correspondant à la tension optimale du GPV. Les avantages de cette technique résident principalement sur la robustesse vis-à-vis des perturbations dues à la source, dans la rapidité à obtenir la tension moyenne en un seul cycle de commutation (le régime transitoire s'établissant alors en un seul cycle unique) et surtout dans la simplicité de l'implémentation.

Cette section porte sur la présentation du concept, de la théorie et de la simulation de cette technique pour un convertisseur DC/DC. Deux cas de régulation ont été ainsi étudiés: - tension de référence constante, - tension de référence variable (poursuite du PPM), afin de connaître les aptitudes de ce type de contrôle, quant à la poursuite de la référence, et en vue de montrer la robustesse de la technique vis-à-vis des perturbations de la source (GPV); cette dernière étant assimilée à une source de tension continue, et présentant des fluctuations (bruit).

2.1. Concept de la commande en un seul cycle

Pour mettre en évidence la technique de commande en un seul cycle 'One Cycle Control -OCC', le convertisseur continu-continu choisi est un hacheur dévolteur 'Buck Converter', à base de transistor qui s'intercale entre la source de tension v_g et la charge résistive R . La figure 2.3 représente le synoptique de ce convertisseur. Le fonctionnement du convertisseur s'effectue à une fréquence de commutation fixe $f_s = 1/T_s$, où T_s est la période de commutation du transistor (switch).

Lorsque le transistor est en conduction, la diode étant bloquée et la tension de sortie v_s aux bornes de la diode est donc égale à la tension d'entrée v_g . Le filtre passe-bas LC transmettra donc à la charge résistive la valeur moyenne de la tension de sortie v_s et en rejettera aussi les harmoniques indésirables de cette tension. La tension de la charge v_c est la superposition de la valeur désirée à des ondulations résiduelles.

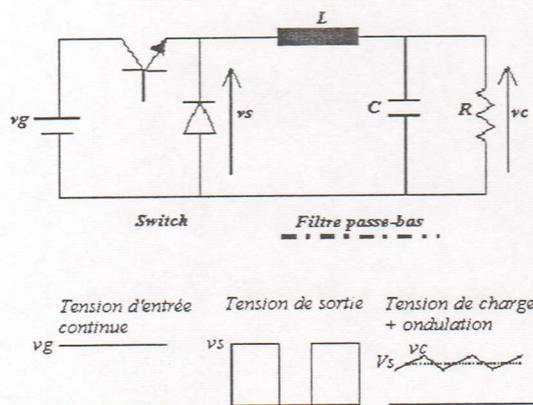


Figure 2.3 : Convertisseur continu – continu dévolteur

L'observation minutieuse de la variable de sortie du hacheur v_s nous amène au constat suivant : la tension de charge est donc égale à la valeur moyenne de la variable de sortie de l'interrupteur V_s (tension à l'entrée du filtre LC) représenté par l'aire du signal carré obtenu durant un cycle divisé par la période de commutation. Ceci est traduit par la relation suivante :

$$V_s = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_s dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{\alpha T_s} v_g dt \quad (2.3)$$

où α représente le rapport cyclique.

Cette observation peut provoquer donc une nouvelle approche de commande pour les convertisseurs DC/DC fonctionnant à fréquence de commutation fixe. Cette technique est schématisée en figure 2.4. Son principe consiste donc en l'envoi d'une impulsion d'horloge incorporée à une logique de contrôle, permettant la fermeture du transistor au début de chaque cycle de commutation. La tension de sortie v_s sera à la fois intégrée et comparée à la valeur de référence. Dès que la tension intégrée atteint la valeur de référence, le comparateur change d'état, provoquant ainsi l'ouverture du transistor et la remise à zéro de l'intégrateur. Deux cas distincts peuvent se présenter :

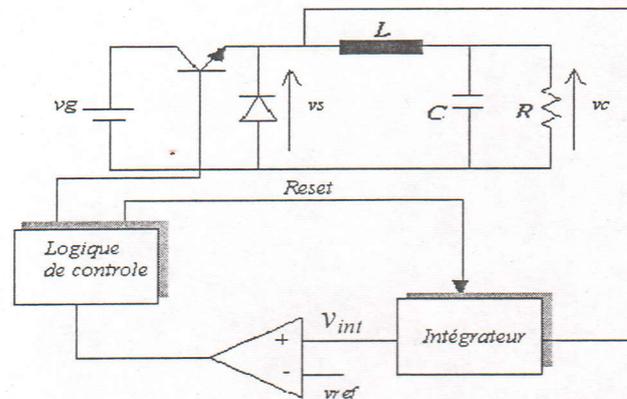


Figure 2.4 : Commande en un seul cycle du convertisseur dévolteur

Dans le premier cas, la tension de référence v_{ref} est considérée comme constante. La valeur moyenne de la variable de sortie sera donc constante, ainsi que la tension de charge v_c (figure 2.5). La pente d'intégration est directement proportionnelle à la tension de la source v_g et la tension v_{int} est continuellement comparée à la référence.

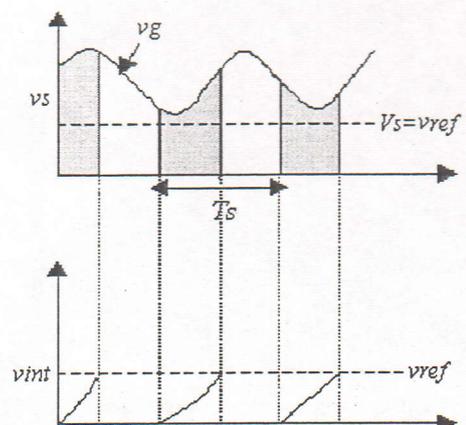


Figure 2.5 : Commande à tension de référence constante

Lorsque la tension de la source v_g est élevée, la pente d'intégration augmente. Dans ce cas, la valeur d'intégration atteint rapidement la valeur de référence de la commande. Par conséquent, le rapport cyclique α est faible. Quand la tension de la source est faible, le rapport cyclique s'accroît.

Tandis que dans le second cas, la tension de référence est supposée fonction du temps, la valeur moyenne de la variable de sortie v_s sera donc égale à la tension de référence à chaque cycle. Ce cas d'augmentation d'un seul palier de la tension de référence est illustrée en figure 2.6

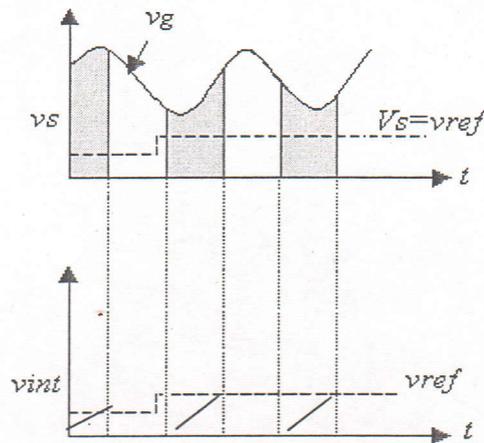


Figure 2.6 : Commande à référence variable

Au premier cycle, la tension v_{int} aura tendance à atteindre rapidement v_{ref} , et donnera un faible rapport cyclique, puis la pente va en s'élargissant au cycle suivant (le rapport cyclique augmente). Avec cette nouvelle technique, le rapport cyclique α peut s'exprimer implicitement par la relation ci-dessous :

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{\alpha T_s} v_g dt = v_{ref} \quad (2.4)$$

Ce rapport α , pour un cycle quelconque, est indépendant des états des cycles précédents. C'est pour cela que le régime transitoire de la valeur moyenne de la tension de sortie s'établirait en un seul cycle. D'où le nom approprié définissant cette technique de commande non linéaire est désigné '*commande en un seul cycle*' (One Cycle Control - OCC). La variable de contrôle α s'exprime par l'équation non linéaire (2.4) reliant la tension de la source v_g à la tension de référence. Avec cette nouvelle technique, la tension de charge du convertisseur devient alors une fonction linéaire de la valeur de référence, indépendamment de la tension d'entrée. La fonction de transfert du système est exprimée par la relation suivante:

$$\frac{v_c}{v_{ref}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{L}{R}\right)s + LCS^2} \quad (2.5)$$

2.2. Théorie de la technique

Si le fonctionnement de l'interrupteur est considéré à fréquence de commutation fixe, alors il est régi par la fonction suivante :

$$k(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < t_{on} \\ 0 & t_{on} < t < T_s \end{cases} \quad (2.6)$$

Pour chaque cycle de commutation, l'interrupteur a une durée de fermeture t_{on} et une durée d'ouverture t_{off} , telles que $t_{on} + t_{off} = T_s$. Le rapport cyclique $\alpha = t_{on} / t_{off}$ est ainsi modulé par le signal de la tension de référence v_{ref} .

Le signal d'entrée $x(t)$ est haché par l'interrupteur et transféré à la sortie en une forme d'onde comme variable de sortie $y(t)$. La fréquence et la largeur d'impulsion de cette variable de sortie $y(t)$ sont similaires à celles de la fonction interrupteur $k(t)$, tandis que sa forme est celle du signal d'entrée $x(t)$ (figure 2.7). Dans ce cas, le signal $y(t)$ peut s'écrire :

$$y(t) = k(t) x(t) \quad (2.7)$$

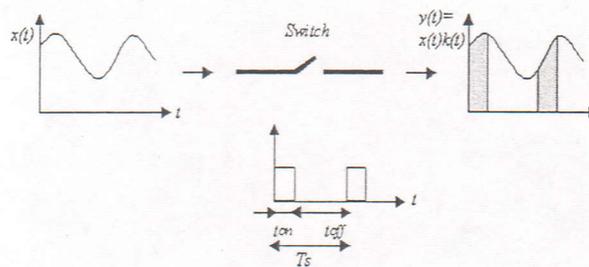


Figure 2.7 : Fonction interrupteur

Si l'on suppose que la fréquence de commutation f_s est largement supérieure à la bande de fréquence de chaque signal $x(t)$ ou $v_{ref}(t)$, le signal effectif obtenu à la sortie de l'interrupteur, c'est-à-dire la valeur moyenne la variable de sortie $y(t)$ est donné par l'expression ci-après :

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} x(t) dt \\ &\approx x(t) \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} dt \\ &= x(t) \alpha(t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

La variable de sortie $y(t)$ est représentée par le produit du signal d'entrée $x(t)$ et du rapport cyclique $\alpha(t)$.

Si le rapport cyclique α de l'interrupteur est modulé, de façon telle que l'intégrale de la variable de sortie $y(t)$ serait égale exactement à la valeur du signal de la tension de référence à chacun des cycles, comme le montre l'expression suivante :

$$\int_0^{t_{on}} x(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_{ref}(t) dt \quad (2.9)$$

alors, la valeur moyenne de la variable de sortie reste égale exactement à la référence, tant que la période de commutation est constante. En conséquence, la valeur moyenne de cette variable de sortie est contrôlée instantanément en un seul cycle, comme cela est indiqué sur les expressions suivantes :

$$y(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} x(t) dt \quad (2.10)$$

$$= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_{ref}(t) dt = v_{ref}(t) \quad (2.11)$$

La technique de commande régie par ce concept est définie comme la technique de commande en seul cycle 'One Cycle Control -OCC'. Le signal effectif donné à la sortie de l'interrupteur serait égal à :

$$y(t) = v_{ref}(t) \quad (2.12)$$

Le schéma du circuit pour l'implémentation de cette technique OCC est représenté par la figure 2.8 Les principaux éléments clés de cette technique sont l'intégrateur et le resetter (RAZ). A chaque cycle de commutation, l'intégration débute au moment où l'interrupteur se ferme, grâce à une impulsion d'horloge. La tension à la sortie de l'intégrateur est de la forme suivante :

$$v_{int} = k \int_0^t x(t) dt \quad (2.13)$$

Cette dernière est comparée instantanément à la valeur de référence, avec k une constante. A l'instant où la tension v_{int} atteint la tension de référence $v_{ref}(t)$, la logique de contrôle génère le signal de commande pour actionner l'interrupteur de l'état ouvert à l'état fermé et dans le même temps elle remet l'intégrateur à zéro. Le rapport cyclique ($\alpha = t_{on} / T_s$) obtenu correspondant à ce cycle est déterminé à partir de l'équation suivante :

$$k \int_0^{\alpha T_s} x(t) dt = v_{ref}(t) \quad (2.14)$$

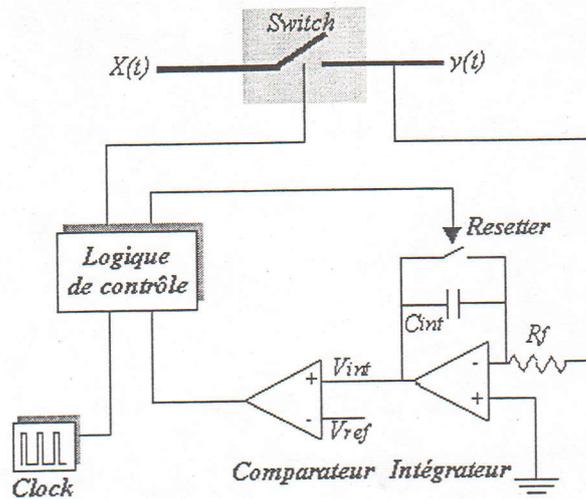


Figure 2.8 : Commande de l'interrupteur à fréquence de commutation fixe

Etant donnée que la période de commutation est constante et $K = 1 / kT_s$, alors la valeur moyenne de la variable la sortie $y(t)$ dans chaque cycle peut se traduire par la relation suivante :

$$y(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{\alpha T_s} x(t) dt = K v_{ref}(t) \quad (2.15)$$

Les différents signaux du système 'Hacheur dévolteur - Circuit de commande', pour une fréquence de commutation f_s fixe, sont représentés dans la figure 2.9.

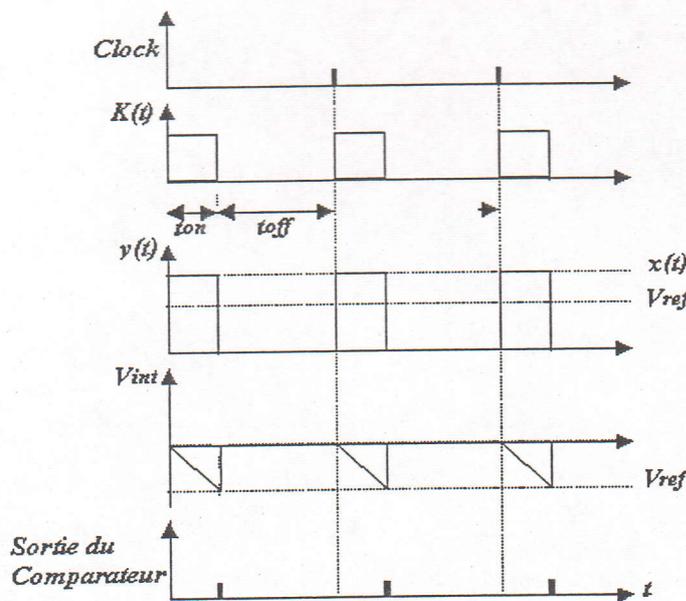


Figure 2.9 : Formes d'ondes des différents signaux

2.3. Etude de simulation

L'étude de simulation de cette technique de commande OCC, appliquée à un convertisseur DC/DC connecté à une charge résistive a été effectuée. Pour la mise en équations du montage du convertisseur, représenté en figure 2.10, la simplification du circuit s'impose.

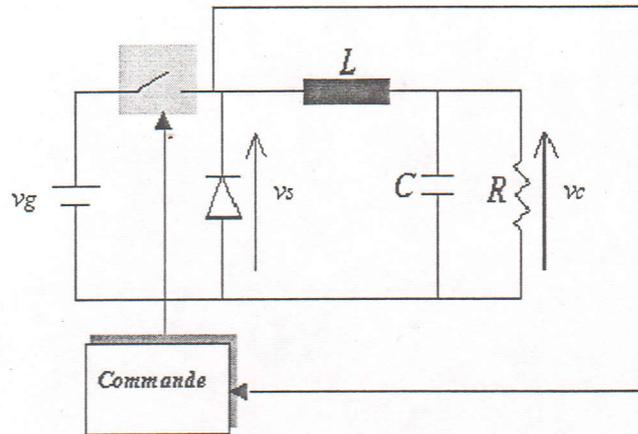


Figure 2.10 : Convertisseur DC/DC dévolteur

Le schéma équivalent de ce montage modifié et modélisé est montré en figure 2.11.

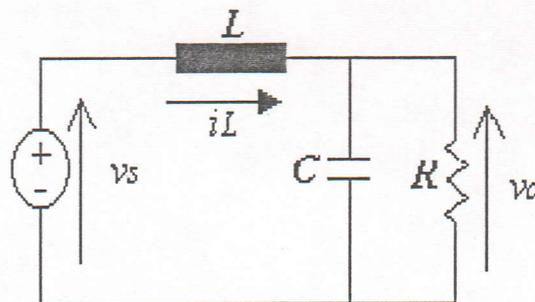


Figure 2.11 : Modèle d'étude

Ce circuit peut être régi par une équation différentielle linéaire du second ordre, dont la fonction de transfert est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{v_c}{v_s} = \frac{1}{1 + \left(\frac{L}{R}\right)s + LCs^2} \quad (2.16)$$

Sachant que la tension d'entrée v_s peut prendre les deux valeurs v_g ou 0. La variable de contrôle α sera déterminée à partir de l'équation suivante :

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{\alpha T_s} v_g dt = v_{ref} \quad (2.17)$$

Compte tenu des possibilités offertes en matière de modélisation et de simulation pour des systèmes dynamiques et de la simplification d'implémentation des modèles grâce à son interface graphique, l'étude de simulation de notre système a été menée par le logiciel Matlab / Simulink [27, 28].

Comme extension à Matlab, Simulink est donc un programme de simulation de systèmes dynamiques, et offre de nombreux outils tout en conservant la puissance et les fonctionnalités de Matlab. Simulink procède en deux étapes : le système à étudier est défini par un modèle mathématique représenté par sa fonction de transfert, puis ce dernier est introduit dans ce programme sous forme de blocs, ce qui constitue la première étape. Quant à l'étape suivante, elle consiste en l'analyse du comportement de système précédemment défini. Le déroulement de la simulation peut être visualisé graphiquement simultanément à l'exécution.

Les résultats obtenus de cette simulation sont facilement accessibles et exploitables sous forme graphique par le biais de bloc "graph" de Simulink.

Le schéma de notre système 'Convertisseur DC/DC Boucle de Régulation' étudié, dans l'environnement Matlab / Simulink est représenté en figure 2.12.

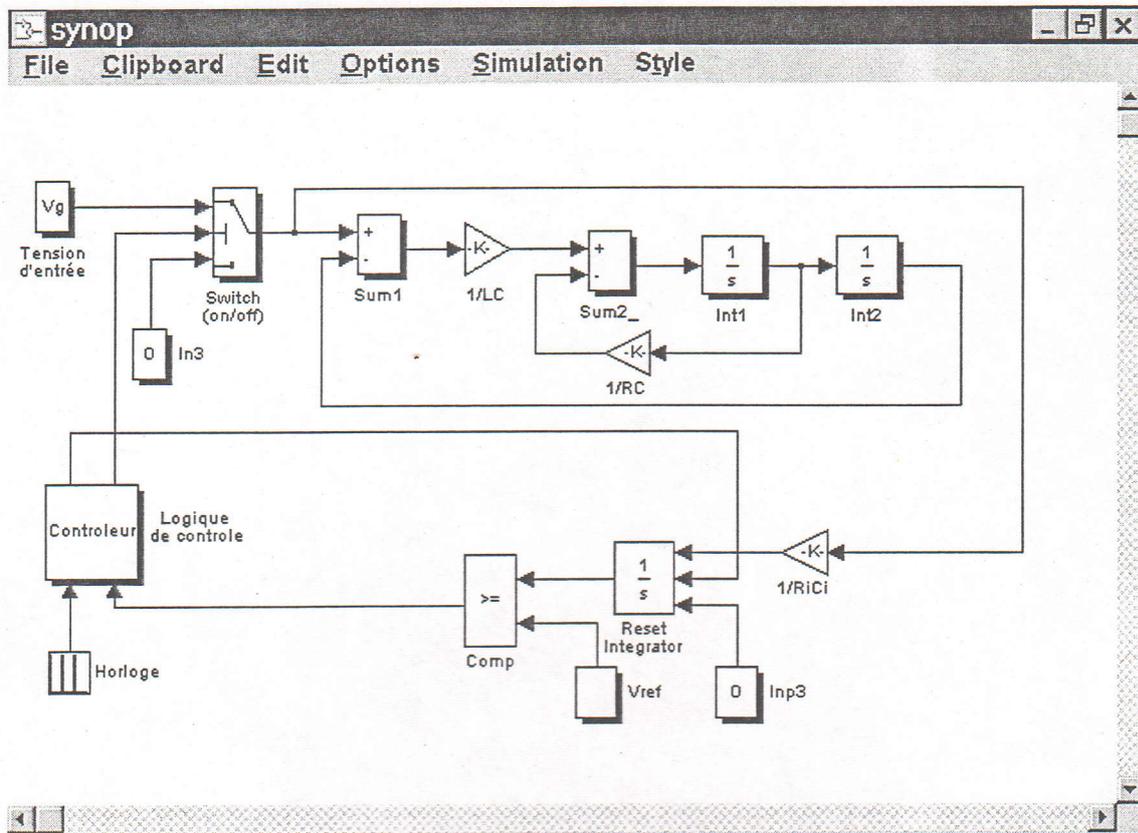


Figure 2.12 : Schéma bloc du système dans l'environnement Matlab / Simulink

Vu la non-disponibilité de modèles caractérisant le générateur photovoltaïque 'GPV' et la batterie de stockage, pour l'application dans le programme Simulink, nous avons adopté comme source d'entrée, un générateur de tension et comme récepteur une charge résistive. Deux cas de figures ont été alors étudiés pour la connaissance des performances de la technique de commande en un seul cycle 'OCC', à savoir :

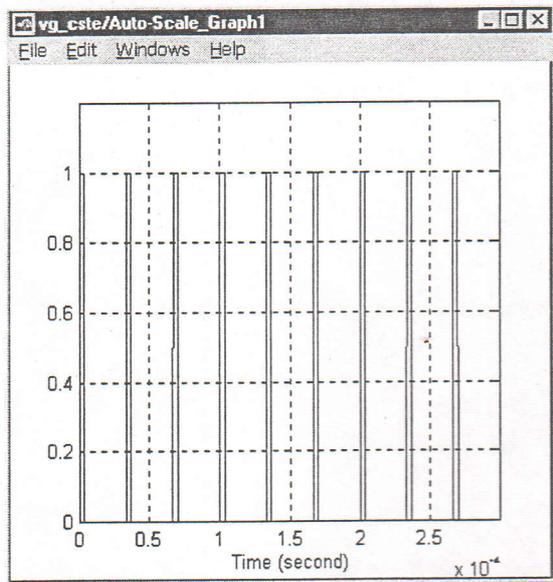
- Tension d'entrée v_g constante (tension de 18V), et tension de référence v_{ref} constante ($v_{ref} = 14$ V)
- Tension d'entrée v_g variable (tension de 18 à 20 V + bruit), et tension de référence v_{ref} variable ($v_{ref} = 12 + \sin(2\pi(ft), f = 5$ kHz).

Les hypothèses de simulation, pour illustrer les résultats obtenus sur notre système, sont données ci-après :

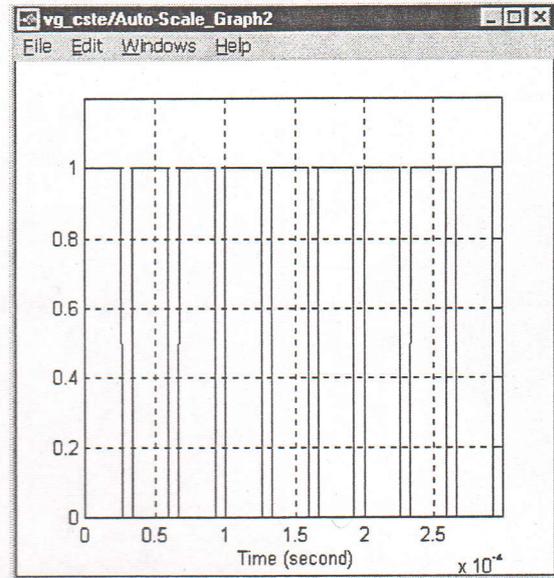
- la fréquence de commutation : $f_s = 1/T_s = 30$ kHz,
- les caractéristiques du filtre sont : $L = 1.5$ mH, $C = 25$ μ F, $R = 6$ Ω ,
- l'interrupteur et la diode sont considérés comme idéaux,
- la méthode utilisée pour le calcul numérique est celle de Runge-Kutta 5.

Les résultats obtenus par simulation par le biais du programme Simulink, pour les deux cas étudiés, sont présentés sur les figures 2.13 et 2.14.

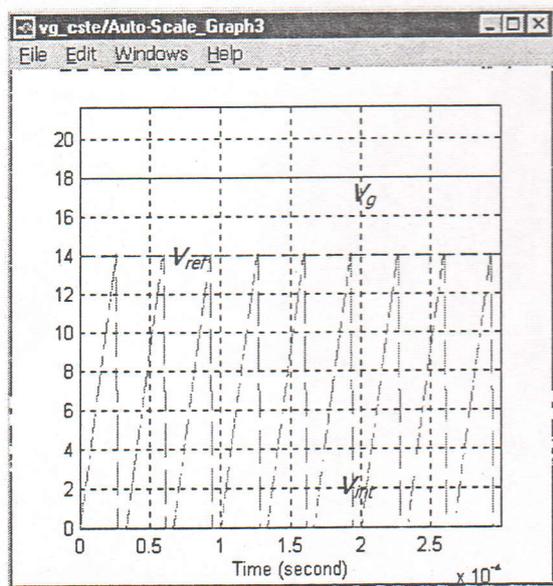
- Dans le premier cas étudié, les paramètres caractéristiques sont les suivants: tension d'entrée constante ($v_g = 18V$), et tension de référence constante ($v_{ref} = 14 V$).



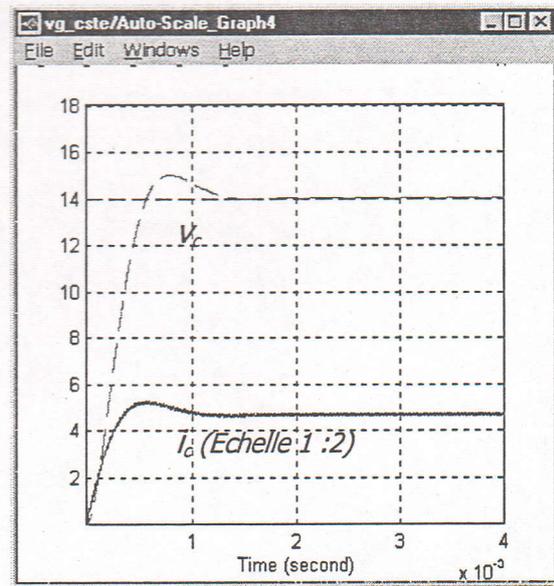
a) Signal d'horloge



b) Signal de commande



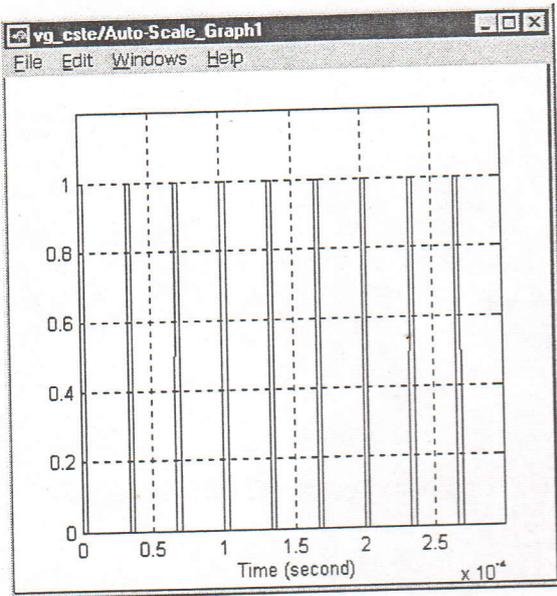
c) Tension à la sortie de l'intégrateur



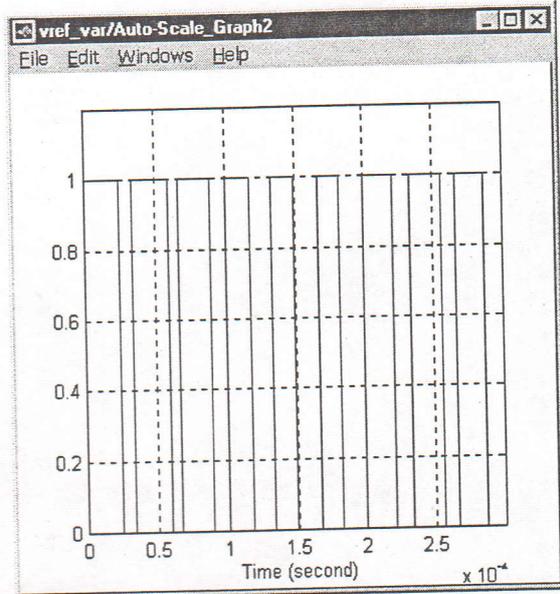
d) Tension et courant de charge

Figure 2.13 : Différents signaux obtenus par simulation pour les tensions v_g constante et v_{ref} constante

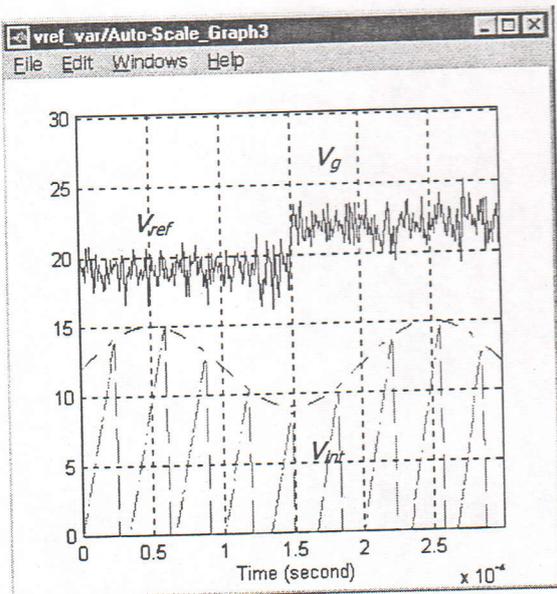
- Tandis que dans le deuxième cas étudié, les paramètres caractéristiques sont les suivants : la tension d'entrée est variable ($v_g = 18 - 20 \text{ V}$), et la tension de référence est variable et peut être assimilée à une sinusoïde ($v_{ref} = 12 + \sin(2\pi(ft), f = 5 \text{ kHz})$).



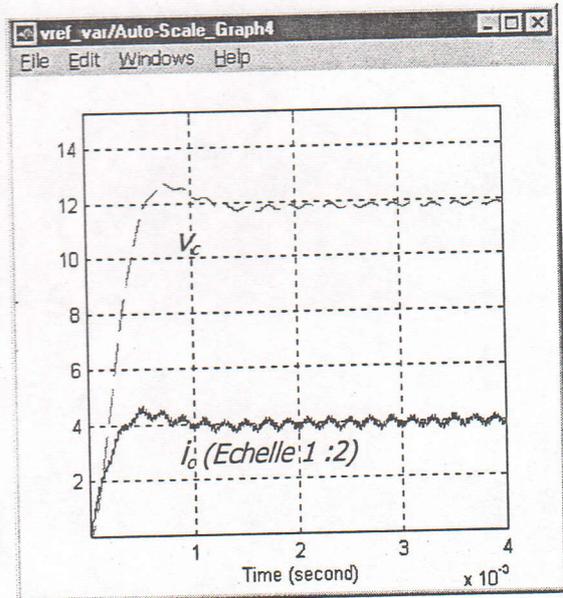
a) Signal d'horloge



b) Signal de commande



c) Tension à la sortie de l'intégrateur



d) Tension et courant de charge

Figure 2.14 : Différents signaux obtenus par simulation pour les tensions v_g variable et v_{ref} variable

En effectuant l'analyse des résultats de simulation, illustrés dans les figures 2.13 et 2.14, obtenus pour la technique OCC de notre système, nous pouvons noter que le suivi de la tension de référence est fait d'une façon parfaite dans les deux cas.

La technique est insensible aux perturbations dues à la source de tension. La valeur moyenne de la variable de tension de sortie du hacheur (tension à l'entrée du filtre) est atteinte en un seul cycle de commutation, grâce aux modulations par la référence du signal de commande.

Toutefois, les signaux de sortie relatifs à la tension et au courant de charge de la batterie ne présentent aucune ondulation dans le premier cas. L'erreur entre la tension de charge v_c et la tension de référence v_{ref} est négligeable.

Tandis que dans le second cas étudié, des petites ondulations apparentes sont visualisées, et ceci relatives à la tension de la charge. Ces ondulations peuvent être annihilées par un dimensionnement fin du filtre LC.

3. TECHNIQUE DE CONTROLE DE L'ETAT DE CHARGE

La technique de contrôle de l'état de charge de la batterie 'SOC', la plus pratique et la plus utilisée, consiste en la mesure et le calcul des quantités d'électricité entrant et sortant dans les deux processus de charge et de décharge en termes d'ampères-heures. Le calcul numérique du 'SOC' se fait à l'aide d'un algorithme de calcul implémenté sur microcontrôleur, qui a pour fonction la commande 'intelligente' des éléments de coupure de charge et de décharge de la batterie.

L'état de charge de la batterie à un instant donné dépend directement de l'état de charge précédent, qui doit être connu au préalable. Cette précision pose un problème lors de la mise en service du système photovoltaïque, qui nécessite la connaissance de l'état de charge initial de la batterie, et ou dans le cas lorsque la charge est déconnectée, la connaissance de l'état de la batterie si elle a subi une décharge excessive.

Pour surmonter ce problème des deux cas extrêmes, la tension de circuit-ouvert de la batterie à l'état complètement stable est également un indicateur, qui donne avec précision le SOC, sachant que cette tension de circuit-ouvert V_{oc} est directement proportionnelle au SOC, et que l'influence de la température de l'électrolyte est presque négligeable [29, 30]. La figure 2.15 donne l'allure de la droite $SOC = f(V_{oc})$ relative entre l'état de charge et la tension de circuit-ouvert de la batterie.

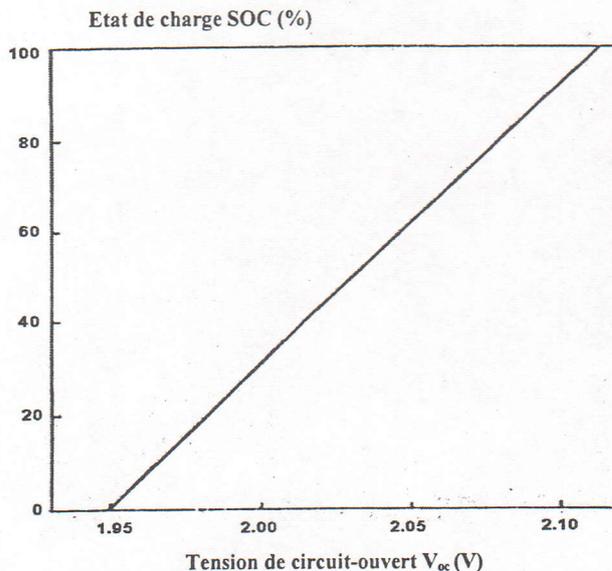


Figure 2.15 : Etat de charge en fonction de la tension de circuit-ouvert de la batterie

La technique de contrôle de l'état de charge de la batterie appropriée repose sur la combinaison des deux méthodes de mesure mentionnées précédemment, à savoir : - la mesure coulombmétrique (mesure des quantités d'électricité en ampère-heures), - et la mesure de la tension de circuit-ouvert.

3.1. Modèle de la mesure coulombmétrique

Le modèle choisi considère que l'état de charge de la batterie SOC est le rapport entre la quantité d'électricité (Ah) reçue ou restituée par la batterie et la capacité nominale (Ah) de la batterie. Pour le calcul en permanence de l'état de charge de la batterie 'SOC' en utilisant la relation récursive suivante [30]:

$$\text{SOC}(t+1) = \begin{cases} \text{SOC}(t) + \eta_b \frac{I_b t}{C} & \rightarrow (\text{cycle de charge}) \\ \text{SOC}(t) - \frac{I_b t}{C} & \rightarrow (\text{cycle de décharge}) \end{cases} \quad (2.18)$$

où :

SOC (t+1) : Etat de charge à l'instant t+1,

SOC (t) : Etat de charge à l'instant t,

η_b : Rendement faradique moyen durant le cycle de charge.

La valeur type est de 0.9,

I_b : Courant à l'entrée et la sortie de la batterie (I_{bi} ou I_{bo}).

Notons que le modèle estime correctement le SOC pendant le cycle de décharge, or il le surestime pendant le cycle de charge, il faudrait donc une mise à jour de l'état de charge à chaque fois que la charge est déconnectée.

3.2. Modèle de prédiction de la tension de circuit-ouvert

Dans un système photovoltaïque, la mesure de la tension de circuit-ouvert de la batterie s'effectue au cours des deux modes de fonctionnement suivants :

- La batterie est au repos (au démarrage du système photovoltaïque);
- La profondeur de décharge est maximale ($\text{SOC} < \text{SOC}_{\min}$, c'est-à-dire que la charge est déconnectée).

En effet, le choix d'un modèle de prédiction de la tension de circuit-ouvert pour la batterie est dicté par les critères suivants :

- Le modèle doit être pratique, car la stabilisation de la tension de circuit-ouvert n'est atteinte qu'après plusieurs heures (figure 2.16). Il est insensé de laisser le système PV hors service durant toute cette période pour le relevé de l'état initial ou la mise à jour de l'état de charge. A cet effet, il est nécessaire de prédire la valeur de la tension de circuit-ouvert avant que la batterie se stabilise complètement après une période de repos raisonnable.
- Le modèle doit s'adapter à tout type de batterie.
- La simplicité d'implémentation dans un environnement micro-programmé.

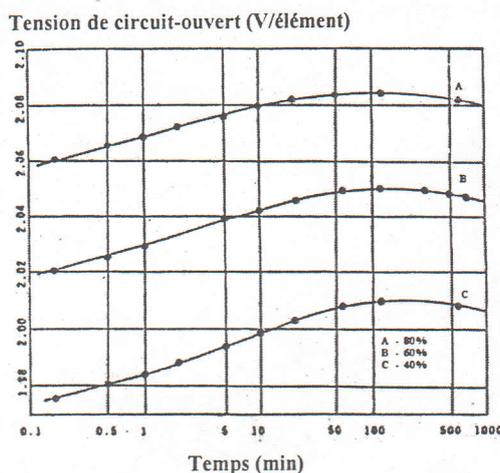


Figure 2.16 : Stabilisation de la tension de circuit-ouvert pour différents états de charges 80, 60, 40 % et un courant de décharge de 5A

Dans ce sens, nous avons opté pour le modèle développé par K. Short [31; 30].

Au début, l'auteur considère qu'une durée de 30 minutes est suffisante pour la détermination de la tension de circuit-ouvert, toute en effectuant un seul point de mesure de la tension sur la courbe de stabilisation de la tension, et cela sans tenir compte du processus de charge ou de décharge. L'équation donnant la tension de circuit-ouvert s'écrit:

$$V_{oc} = V_{ts} + K_v \quad (2.19)$$

Où

- V_{oc} : Tension de circuit-ouvert de la batterie à l'état complètement stable,
- V_{ts} : Tension à l'instant t_s ,
- t_s : Temps arbitraire de stabilisation de la batterie. Il est égal à 30 minutes.
- K_v : Constante spécifique relative à la batterie.

La relation (2.19) précédente n'est valable que dans le cas où la batterie est bien spécifiée, et donc ses principales caractéristiques sont bien connues, car la constante K_v varie selon le type de batterie utilisée.

Afin de compenser cette anomalie et rendre le modèle plus pratique, une autre alternative est permise, quant à la prédiction de V_{oc} , pour une réduction adéquate de la durée de repos, a été développée par K. Short [31]. Cette alternative se base sur l'approximation de la courbe de stabilisation de la tension $V_{oc}(t)$ par deux asymptotes représentées dans un référentiel semi-logarithmique, comme cela est représenté par le graphe de la figure 2.17.

Une nouvelle variable x a été introduite pour substituer la variable temps t (exprimée en minutes), où x est l'exposant du temps t . L'expression qui relie ces deux variables peut alors s'écrire comme suit :

$$t = 10^x \quad (\text{exprimé en minutes}) \quad (2.20)$$

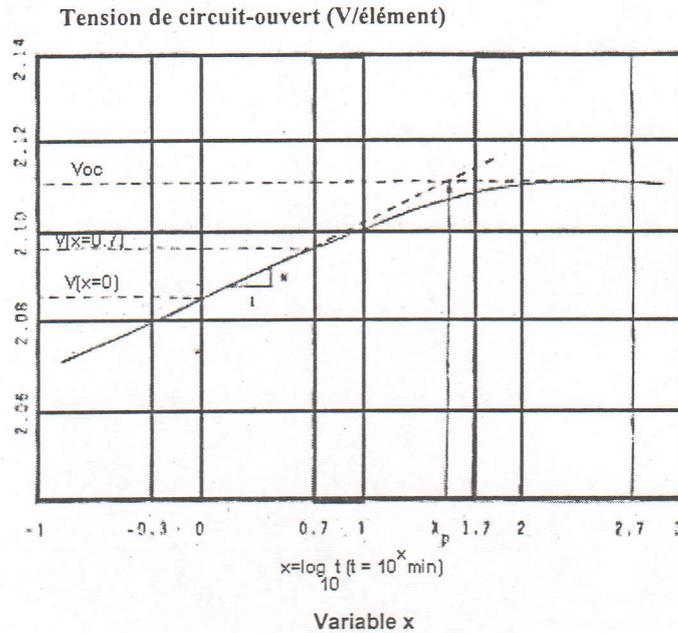


Figure 2.17 : Tension de circuit-ouvert en fonction de la variable x

Le point x_p représente la valeur correspondante à l'intersection des deux asymptotes dans le graphe précédent. Par conséquent, la courbe reliant la tension de circuit-ouvert V_{oc} à cette variable x_p devient une droite linéaire, dont l'expression est donnée ci-après :

$$V_{oc} = M x_p + V_0 \quad (2.21)$$

où

- M : Pente de la première asymptote,
- x_p : Valeur de x au point d'intersection des deux asymptotes,
- V_0 : Tension déterminée à t égal à une minute ($x = 0$).

L'étude expérimentale a été menée par l'auteur [31] sur plusieurs types de batterie pour la détermination de la valeur typique de x_p correspondant à l'instant de stabilisation de la tension de circuit-ouvert. La campagne de mesures de la tension de circuit-ouvert sur différentes batteries est effectuée aux points suivants : $x = 0$ ($t = 1$ min); $x = 0.7$ ($t = 5$ min).

La pente est calculée par l'expression suivante :

$$M = \frac{V_{0.7} - V_0}{0.7} \quad (2.22)$$

et la valeur typique de x enregistrée est égale à 1.64, d'où l'équation de la tension de circuit-ouvert de la batterie s'écrit :

$$V_{oc} = 1.64 M + V_0 \quad (2.23)$$

Les étapes pratiques de la détermination de la tension de circuit-ouvert V_{oc} de la batterie à l'état stable sont les suivantes :

- Etape 1 : Acquisition de la valeur de la tension de circuit-ouvert initiale V_0 à l'instant $t = 1$ minute ($x = 0$),
- Etape 2 : Acquisition de la valeur de la tension de circuit-ouvert $V_{0.7}$ à l'instant $t = 5$ minutes ($x = 0.7$),
- Etape 3 : Calcul de la pente M par l'expression précédente, (Eq. 2.22)
- Etape 3 : Calcul de la tension de circuit- ouvert V_{oc} de la batterie.

Après avoir déterminé la valeur de la tension de circuit-ouvert de la batterie à l'état stable, l'état de charge initial 'SOC' peut se calculer en utilisant l'équation linéaire qui relie le SOC et la tension V_{oc} , $SOC = f(V_{oc})$ relative à la batterie utilisée.



3.3. Algorithme général de contrôle du SOC

L'organigramme principal de l'algorithme de contrôle de l'état de charge 'SOC' de la batterie est représenté sur la figure 2.18

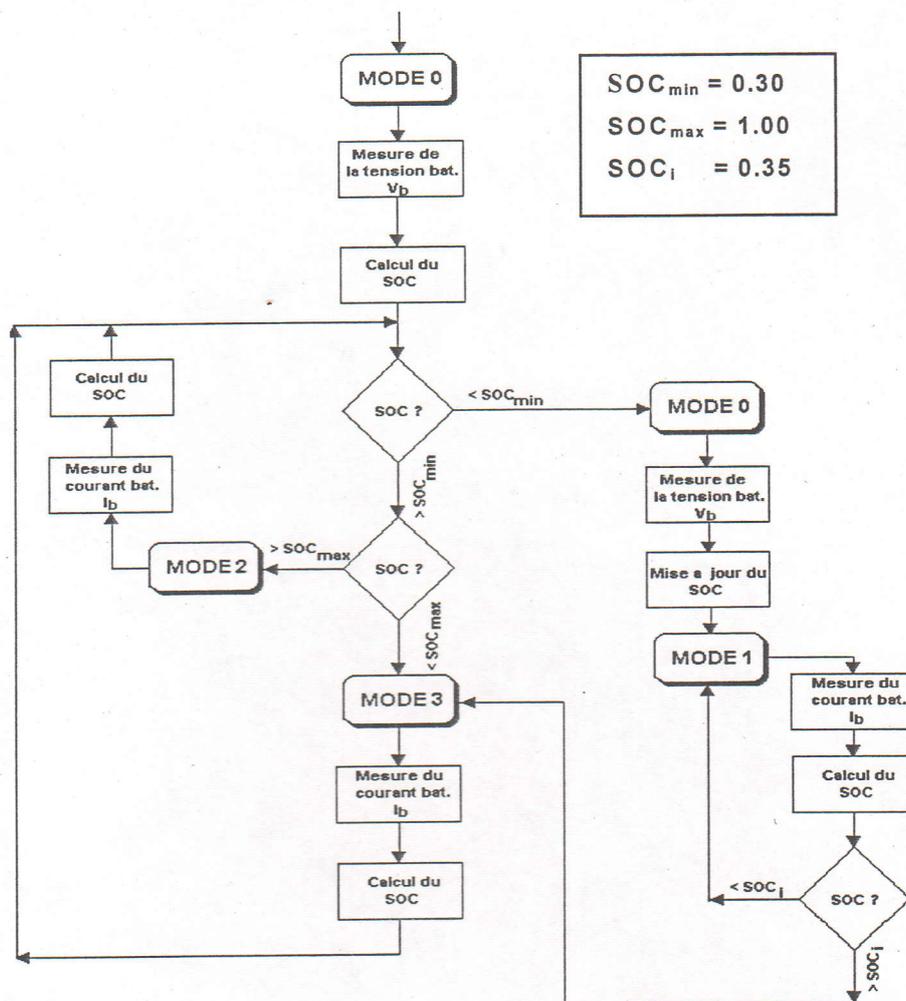


Figure 2.18 : Organigramme général

Mode	Interrupteurs		Etat de la batterie
	SW1	SW2	
0	OFF	OFF	Batterie au repos
1	MPPT (ON)	OFF	$SOC < SOC_{min}$ ou $SOC < SOC_i$
2	OFF	ON	$SOC \geq SOC_{max}$
3	MPPT (ON)	ON	$SOC_{min} < SOC \leq SOC_{max}$

Tableau 2.2 : Modes de fonctionnement

Le contrôle de l'état de charge de la batterie dans le système photovoltaïque se fait suivant les modes décrits ci-après:

- **MODE 0** : Le générateur photovoltaïque et l'utilisation sont déconnectés (batterie au repos). Ce cas correspond à l'instant initial dans la mise en service du système PV .
- **MODE 1** : Le générateur est connecté (MPPT en fonctionnement) et l'utilisation est déconnectée. Dans ce cas, la batterie est en train de subir un processus de charge jusqu'à ce que l'état de charge atteigne le seuil intermédiaire SOC_i .
- **MODE 2** : Le générateur est déconnecté (MPPT hors fonctionnement) et l'utilisation est connectée. Ce qui veut que la batterie est à pleine charge et elle subit une phase de décharge en relation avec l'utilisation.
- **MODE 3**: Le générateur est reconnecté (MPPT en fonctionnement) et l'utilisation est connectée. Dans ce cas, l'état de charge de la batterie devient inférieur à l'état de charge maximal ' SOC_{max} ' et cela pour permettre une charge complète de la batterie.

4. CONCLUSION

Dans cette partie, nous avons présenté la stratégie de régulation et de contrôle de l'état de charge de la batterie dans un système photovoltaïque, adoptée. Elle se base principalement sur le contrôle automatique (et microprogrammé) de l'état de charge en termes d'ampères-heures.

A cet effet, deux modèles significatifs de la batterie ont été ainsi développés pour être implémentés dans le microcontrôleur choisi. Quant à l'optimisation de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque, nous avons opté pour une nouvelle technique de commande en un seul cycle 'OCC'. Les résultats issus de la simulation de cette dernière sont appréciables.

IMPLEMENTATION MATERIELLE

1. INTRODUCTION

L'objet de ce chapitre consiste en la mise en œuvre matérielle de l'approche de régulation et de contrôle de l'état de charge 'SOC' de la batterie étudiée précédemment.

L'approche de la régulation et du contrôle repose principalement sur deux techniques, à savoir:

- Optimisation de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque, pour une meilleure charge de la batterie, en utilisant la technique de commande analogique 'Commande en un seul cycle -OCC', pour le pilotage du convertisseur DC/DC
- Estimation et contrôle numérique instantanés du 'SOC' de la batterie

L'implémentation de ces deux techniques combinées est concrétisé par la mise au point d'un dispositif à architecture de type modulaire, comprenant les deux unités appropriées et désignées respectivement 'Unité de régulation ou MPPT' et 'Unité de contrôle'.

Ce chapitre présente les principales caractéristiques de l'implémentation matérielle du dispositif développé à cet effet pour réguler et contrôler l'état de charge de la batterie dans un système photovoltaïque autonome.

2. UNITE DE REGULATION

La principale fonction de l'unité de régulation ou MPPT 'Maximum Power Point Tracking' est d'assurer le transfert de la puissance maximale du générateur PV pour charger la batterie, via un convertisseur DC/DC. L'approche de poursuite du point de puissance maximale (PPM) est basée sur la régulation de la tension du générateur PV à une tension de référence correspondant à la tension optimale du PPM. La tension de référence est obtenue grâce à une cellule pilote. La technique de régulation utilisée pour la gestion du convertisseur DC/DC est la commande en seul cycle 'One Cycle Control -OCC'. Celle-ci est une technique analogique non linéaire simple dont les éléments clés consistent en une horloge, un intégrateur, un comparateur et une logique de commande, et sont représentés sur le schéma synoptique de la figure 3.1.

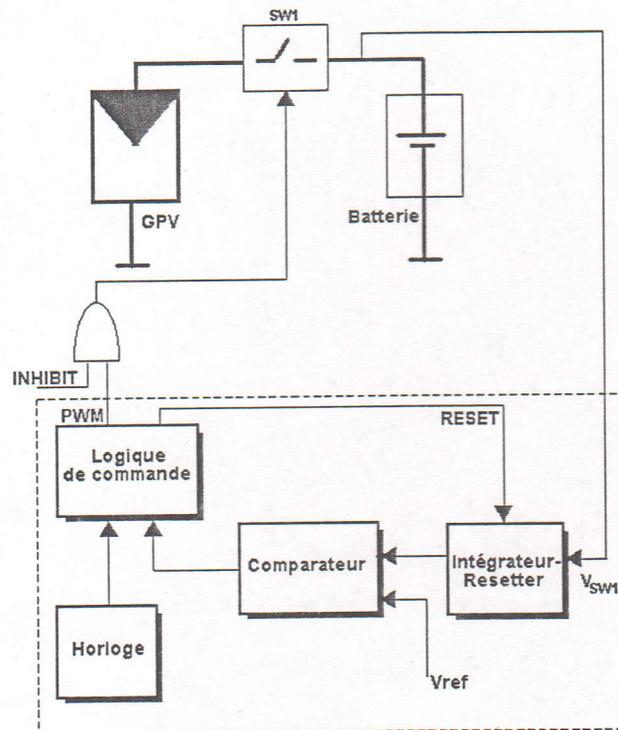


Figure 3.1 : Schéma synoptique de l'unité de régulation dans un système PV

Pour une parfaite connaissance de la fonction de chaque élément mentionné ci-dessus, nous présentons l'implémentation matérielle effective dans l'unité de régulation et le rôle de chacun des éléments la constituant. Le schéma électrique de l'unité de régulation est illustré en figure 3.2.

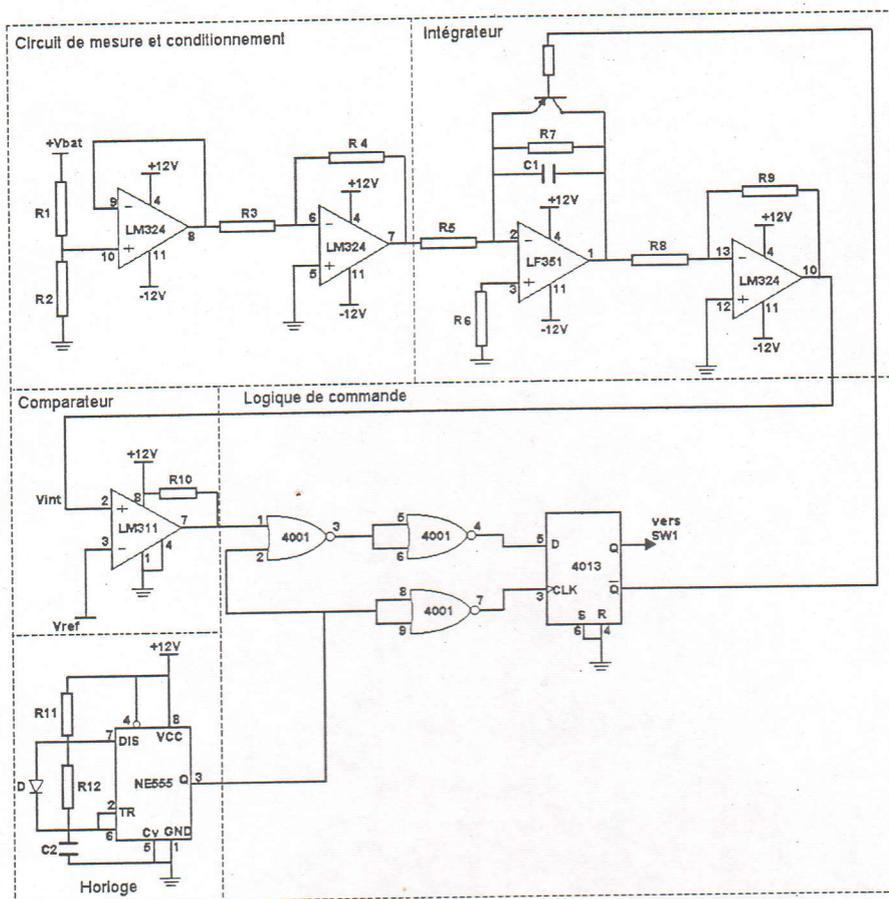


Figure 3.2 : Schéma électrique de l'unité de régulation

2.1. Circuit de mesure et de conditionnement

Etant donnée que la tension à la sortie de l'interrupteur est grande et de caractère aléatoire, il est donc nécessaire d'effectuer la réalisation d'un circuit d'adaptation de celle-ci ou plutôt un circuit de mesure et de conditionnement pour qu'elle soit compatible au circuit de commande.

Les éléments de ce circuit de mesure sont composés d'un diviseur et d'un suiveur à base d'un circuit intégré LM324 pour éviter l'altération de la tension.

2.2. Horloge

Cet élément permet la synchronisation de la fermeture de l'interrupteur à chaque période de commutation ($f = 30 \text{ kHz}$) via la logique de commande. L'obtention du signal d'horloge est réalisée grâce au circuit NE555, dont le rapport cyclique le plus faible possible, est fixé par les deux résistances R_1 et R_2 et le condensateur C_2 .

Pour notre cas, la période du signal est de 33.33 μ s. Cette dernière est définie par la relation :

$$T = T_c + T_d = 0.69 (R_1 + R_2) C_2$$

où :

T_c est le temps de charge; $T_c = 0.69 R_2 C_2$

T_d est le temps de décharge; $T_d = 0.69 R_1 C_2$

Pour un rapport cyclique égal à 1/20 de la période T, alors $1/20 = R_2 / (R_1 + R_2)$, $R_1 = 19 R_2$

2.3. Intégrateur-resetter

Cet élément a pour but de réaliser la fonction intégrale de la tension à la sortie de l'interrupteur 'SW1' grâce au circuit intégré LF351. La tension intégrée sera comparée à une tension de référence. Dès qu'elle atteint la référence, le comparateur change d'état, provoquant via la logique de commande l'ouverture de l'interrupteur et la remise à zéro de l'intégrateur. Cette dernière se réalise par le transistor bipolaire TR.

2.4. Comparateur

La comparaison de la tension à la sortie de l'intégrateur avec la tension de référence (tension optimale du générateur PV) est réalisée à l'aide du circuit intégré LM311. Le niveau logique obtenu à la sortie de ce comparateur sera transmis à la logique de commande afin de générer les deux signaux de commande des deux interrupteurs 'SW1' et 'SW2'.

2.5. Logique de commande

A chaque impulsion d'horloge qu'elle reçoit, la logique de commande génère deux niveaux logiques, l'un (niveau haut) pour la fermeture de l'interrupteur 'SW1' et l'autre (niveau bas) pour la mise en fonctionnement l'intégrateur. Une fois que le comparateur change d'état, la logique de commande inverse les états des deux sorties logiques. En conséquence l'interrupteur s'ouvre et l'intégrateur se met à zéro. Et la séquence se répète après envoi d'une nouvelle impulsion d'horloge.

Les circuits constituant cet élément sont : la bascule D4013 et les trois portes logiques 4001.

3. UNITE DE CONTROLE

La tâche de fond de l'unité de contrôle est d'évaluer à chaque instant la valeur de l'état de charge 'SOC' et de générer au moment opportun les deux signaux (S1 et S2) de commande respectivement les deux interrupteurs 'SW1' et 'SW2' placés en amont et en aval de la batterie pour un mode de fonctionnement adéquat.

Les différents cas possibles de fonctionnement des interrupteurs sont montrés sur le tableau suivant :

Etat de la batterie	Signaux		Modes de fonctionnement des interrupteurs	
	S1	S2	SW1	SW2
Batterie déchargée $SOC < SOC_{min}$	1	0	ON (MPPT)	OFF
Batterie à l'état Intermédiaire $SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$	1	1	ON (MPPT)	ON
Batterie complètement Chargée $SOC > SOC_{max}$	0	1	OFF	ON
Batterie au repos (système PV hors service)	0	0	OFF	OFF

Tableau 3.1: Modes de fonctionnement des interrupteurs

La valeur de l'état de charge 'SOC' de la batterie et la génération des deux signaux logiques de commande (S1 et S2) sont obtenus à l'aide d'un programme développé, écrit en langage BASIC V1.0 [annexe 1] et stocké dans la mémoire interne du microcontrôleur 8052 AH BASIC[32, 33].

Dans la section suivante, une description appropriée de la partie matérielle de l'unité de contrôle (hardware) et de la partie programmation (software) est effectuée.

3.1. Hardware

Le schéma synoptique des différents blocs constituant l'unité de contrôle est donné sur la figure 3.3.

Cette unité, sous forme de blocs, se compose de deux modules principaux :

- Module de base;
- Module d'acquisition.

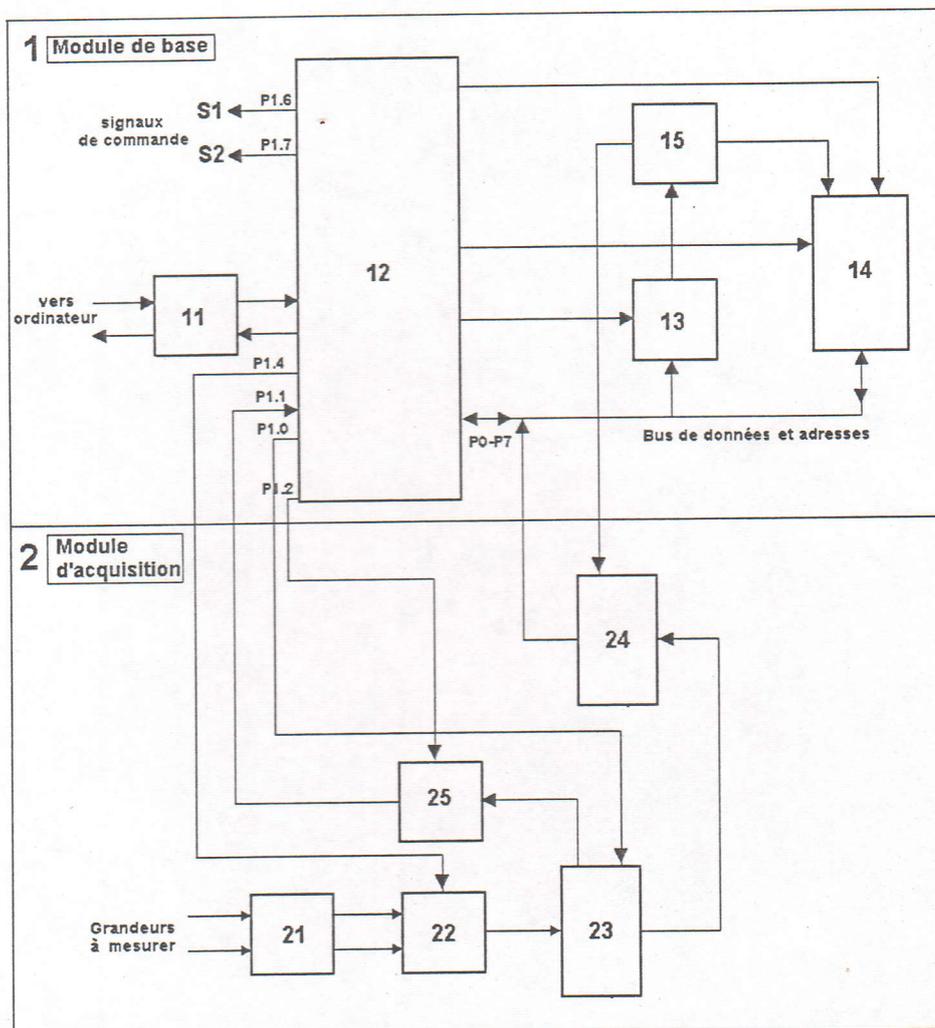


Figure 3.3 : Schéma synoptique de l'unité de contrôle

Légendes

- 1 – Module de base
 11 - interface série, 12 - microcontrôleur, 13 - latch, 14 - mémoire de données
 15 - décodeur d'adresses.
 2 – Module d'acquisition
 21 - circuit de mesure et de conditionnement, 22 - multiplexeur, 23 - convertisseur A/N, 24 - buffer, 25 - circuit de détection de fin de conversion.

3.1.1. Module de base

Le module de base est décrit par le schéma électrique illustré à la figure 3.4. L'élément crucial de ce module est le microcontrôleur de type 8052 AH BASIC [annexe 1]. Ce dernier comporte l'interpréteur BASIC V1.0 logé dans une ROM interne et il possède une horloge interne dont sa fréquence de travail est de 12 MHz, définie par le quartz connecté entre les broches XTAL1 et XTAL2. Les condensateurs C₁ et C₂ servent à garantir un démarrage précis de l'oscillateur. Pour assurer une mise en route correcte, le microcontrôleur nécessite la remise à zéro obtenu à partir d'une cellule RC.

Le port P0 du microcontrôleur présente tour à tour le poids faible des adresses et des données. Un latch de type 74373 sert de verrou de démultiplexage d'adresses et données disponibles sur les lignes d'adresses / données du port P0.

Le groupe de huit résistances R9 à R16 connectées aux sorties du port P0 représente des résistances de pull-up, garantissant le niveau 1 logique.

Le port P2 est utilisé pour le poids fort des adresses de la mémoire de données. Les signaux RD et WR sont utilisés pour effectuer respectivement une opération de lecture et une opération d'écriture dans l'espace mémoire de données externe RAM6264.

Les deux lignes P1.6 et P1.7 du port 1 sont utilisées pour générer les deux signaux logiques (S1 et S2) destinés à la commande des deux interrupteurs 'SW1' et 'SW2'. Le signal S1 est toujours maintenu au niveau 1 logique, sauf en cas d'inhibition de la fonction de l'unité de régulation (batterie chargée), le signal S1 passe au niveau 0 logique.

La ligne P1.4 est utilisée pour la sélection de la voie de mesure du multiplexeur. Deux niveaux logiques 1 et 0 sont générés pour l'activation de la mesure respective de courant et de la tension de la batterie.

Les trois lignes P1.2, P1.0 et P1.1 sont destinées respectivement à l'initialisation du circuit de détection de fin de conversion, à l'activation de la conversion analogique-numérique et à la détection de fin de conversion.

Le microcontrôleur 8052 AH BASIC dispose de deux lignes sérielles TxD et RxD, permettant l'échange d'information ou le dialogue entre le microcontrôleur et le terminal (micro-ordinateur). Le circuit MAX232 permet de convertir respectivement les niveaux TTL (0 et 5V) aux niveaux (-12V et 12V) correspondant à la norme RS232.

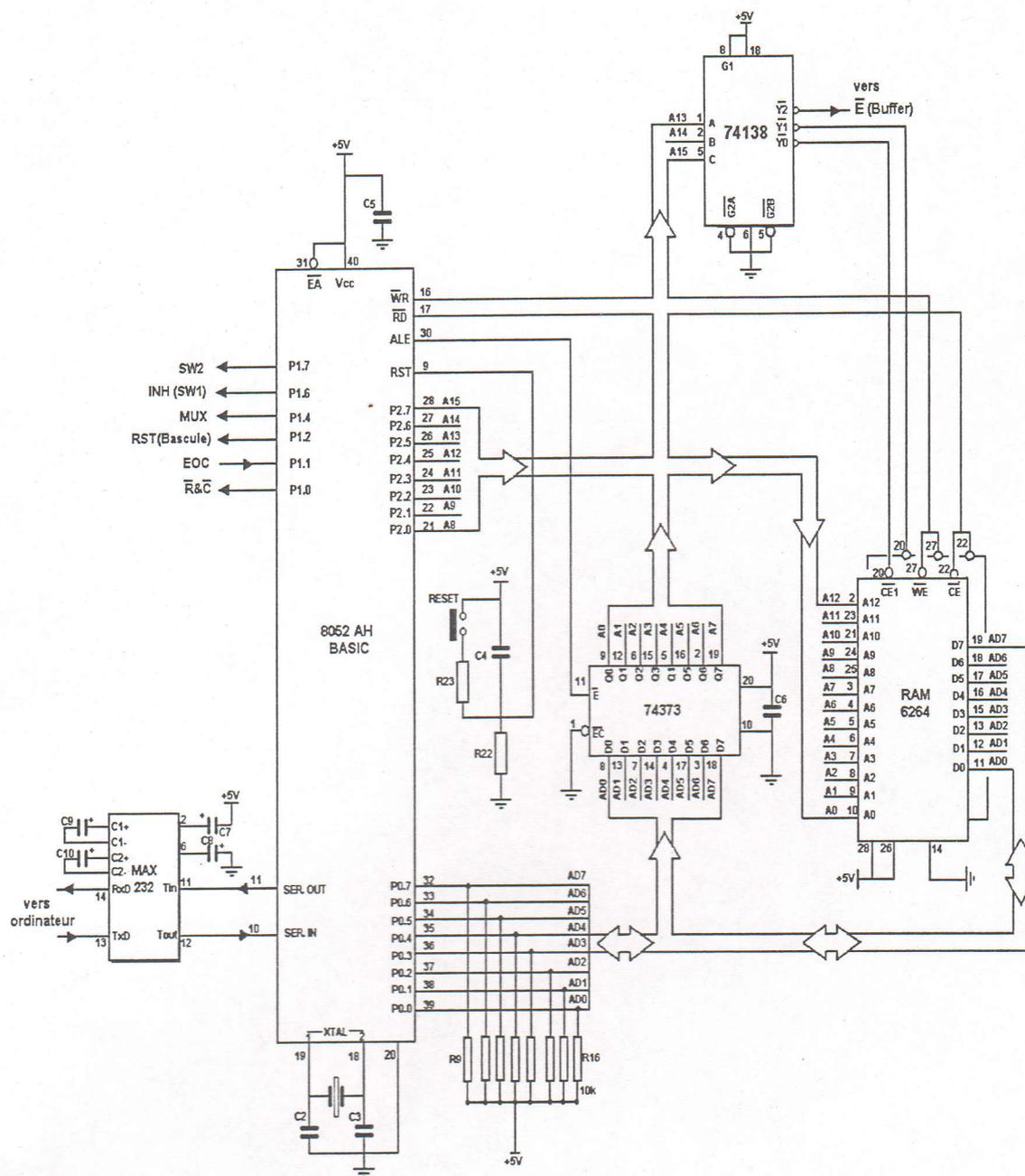
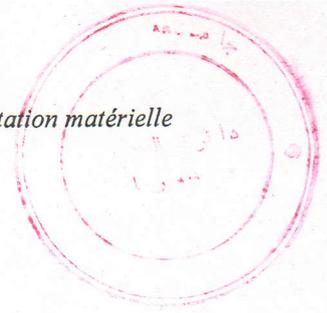


Figure 3.4 : Schéma électrique du module de base



3.1.2. Module d'acquisition

Ce module a pour rôle l'acquisition des grandeurs électriques nécessaires à l'estimation de l'état de charge 'SOC' de la batterie. Dans notre cas, Il s'agit du courant et de la tension de circuit-ouvert de la batterie.

En effet, le module d'acquisition se compose des éléments suivants (figure 3.5) :

- circuit de mesure et de conditionnement, - multiplexeur, - convertisseur analogique-numérique, - circuit de détection de fin de conversion

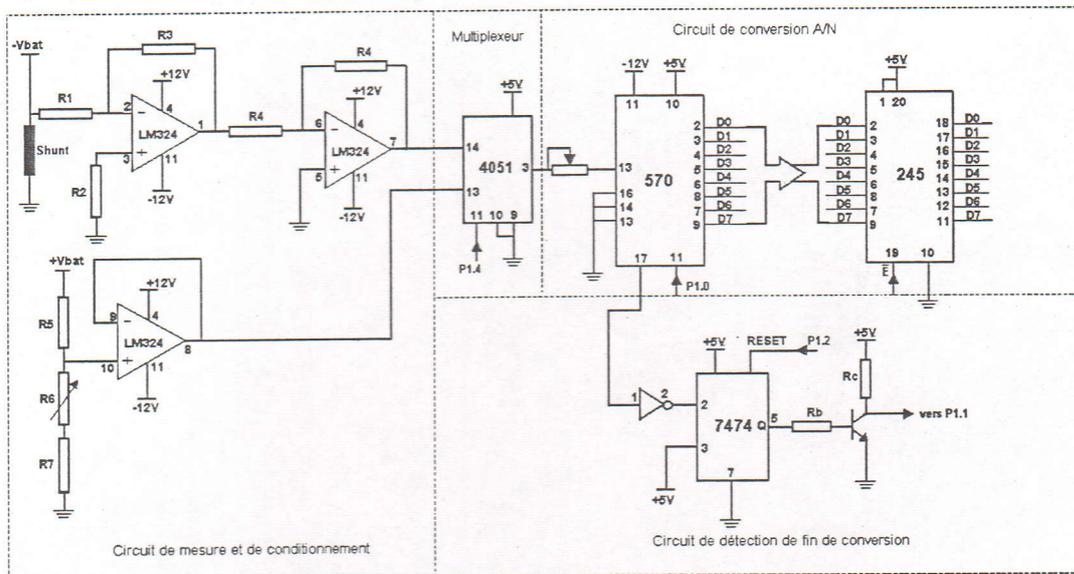


Figure 3.5 : Schéma électrique du module d'acquisition

3.1.2.1. Circuit de mesure et de conditionnement

La chaîne de mesure du courant de la batterie est effectuée par un shunt. Le signal analogique obtenu est faible, une adaptation de celui-ci est donc nécessaire, pour qu'il soit dans la gamme de circuit de conversion (0 – 5V). Le double circuit LM324 est utilisé pour servir d'amplificateur et de suiveur.

De l'autre côté, vu que la tension de circuit-ouvert de la batterie est grande, un diviseur et un suiveur sont utilisés pour assurer l'adaptation de la tension à l'entrée du convertisseur.

3.1.2.2. Multiplexeur

Le multiplexeur 4051 reçoit sur ses entrées les deux grandeurs électriques (courant et tension de la batterie). Il est activé par un niveau bas ou niveau haut émis par la broche P13, pour permettre l'aiguillage à une des deux entrées.

3.1.2.3. Convertisseur analogique-numérique

La conversion A/N est assurée par le convertisseur AD570 (8bits) à approximations successives. Il permet la numérisation du courant et de la tension de la batterie.

Dans notre cas, le mode d'opération du convertisseur est bipolaire (- 5 V à + 5 V, 00H à FFH), car le courant de la batterie peut être positif (batterie se charge) ou négatif (batterie se décharge).

Le convertisseur est activé dès qu'il reçoit un niveau bas sur son entrée R&C (lecture/conversion) du port P10 du microcontrôleur. Un signal sera transmis de la broche $\overline{\text{EOC}}$ (end of conversion) indiquant la fin de conversion après 25 μ sc et sera scruté par le port P12 du microcontrôleur via la sortie d'un verrou.

La donnée en sortie du convertisseur A/N sera transmise au buffer 74245, qui est vu par le microcontrôleur comme une case mémoire dont l'adresse est 4000H.

3.1.2.4. Circuit de détection de fin de conversion

Ce circuit est utilisé pour la détection de fin de conversion. Ceci est réalisé à l'aide du verrou 7474, qui donne un état stable (1 logique) à sa sortie, après la détection d'un franc descendant issu de la ligne $\overline{\text{EOC}}$ du convertisseur du CAN. Ceci est explicité par le chronogramme de la figure ci-après.

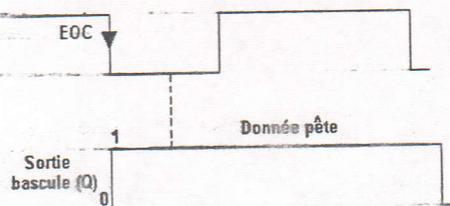


Figure 3.6 : Chronogramme

3.2. Software

Le schéma synoptique du programme de gestion de l'unité de contrôle est donné en figures 3.7-3.10. Le programme est écrit en BASIC V1.0 [annexe 2] et il se décompose en un programme principal 'MAINPROGRAM' et trois routines complémentaires 'START-PV, CHARGE-DISCHARGE et UPDATE' dont chacune d'elles exécute une tâche bien spécifique.

3.2.1. Programme principal 'MAINPROGRAM'

L'organigramme du programme principal développé nommé 'MAINPROGRAM' est représenté sur la figure 3.7.

Ce programme débute par la génération des deux signaux logiques $S1 = 0$, $S2 = 0$, grâce aux pins P16 et P17 relatifs au mode de fonctionnement **MODE 0** ($SW1 = 0$, $SW2 = 0$).

En deuxième lieu, il fait appel à la routine 'START-PV' (démarrage du système photovoltaïque), lequel effectue la tâche de mesure de deux valeurs successives de la tension de circuit-ouvert de la batterie à la période d'échantillonnage de 1 s.

Une fois que cette tâche est achevée, une procédure de test des deux tensions s'engage. En cas d'inégalité (tension de la batterie instable), la routine 'UPDATE' prend le relais pour mettre à jour l'état de charge ou le SOC de la batterie. Si l'égalité est vérifiée, le SOC sera initial sera déterminé par une autre procédure d'évaluation du SOC.

Après avoir déterminé l'état de charge initial, d'autres types de procédures entrent en jeu afin d'effectuer le test du SOC, de génération des signaux S1 et S2 correspondants aux autres modes de fonctionnement et enfin d'évaluer en permanence le SOC à l'aide de la routine 'CHARGE-DISCHARGE'.

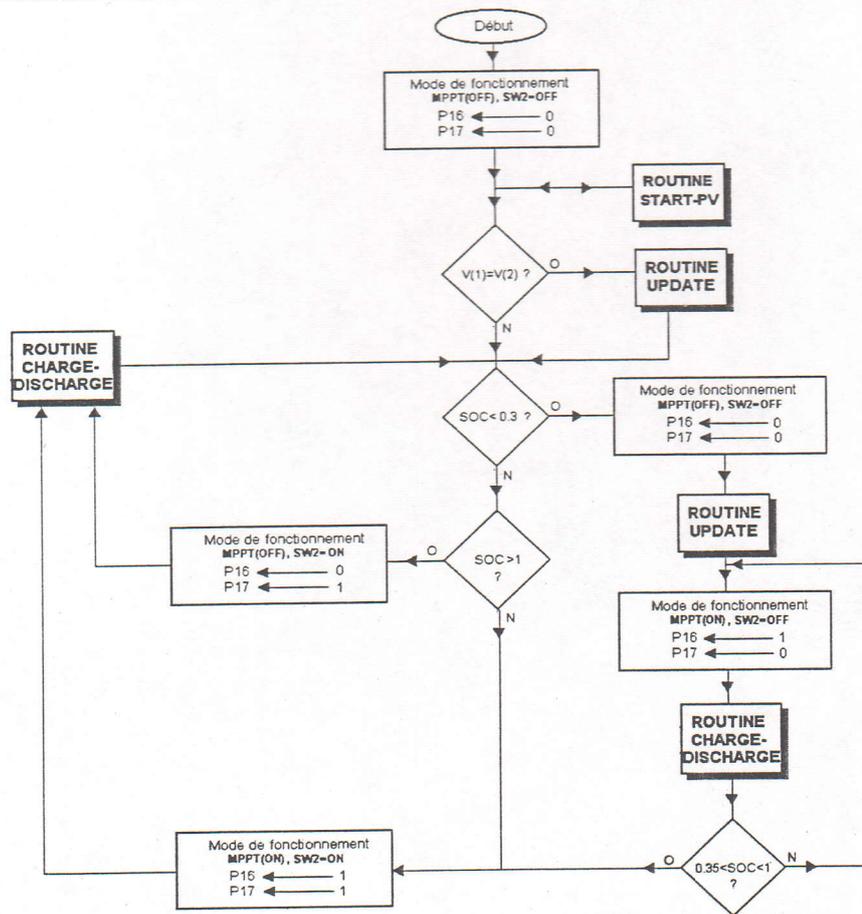


Figure 3.7 : Organigramme de la routine 'MAINPROGRAM'

3.2.2. Routine 'START-PV'

L'organigramme de la routine 'STAR-PV' est illustré en figure 3.8. Cette routine interviendra donc à chaque (re)mise en service ou en fonctionnement du système photovoltaïque. Elle débute par la sélection de la voie de mesure du multiplexeur correspondant à la tension de circuit ($P14 = 0$) et par l'initialisation du circuit de fin de conversion, puis elle enclenche l'horloge temps réel et en active la conversion analogique numérique à chaque période d'échantillonnage de 1s.

La fin de conversion sera détectée par scrutation d'un niveau logique bas par le biais de la broche P10. Après lecture des deux échantillons de tension, l'horloge TR est arrêtée et est remise à zéro. Ensuite, cette routine se termine par un retour au programme principal 'MAINPROGRAM'.

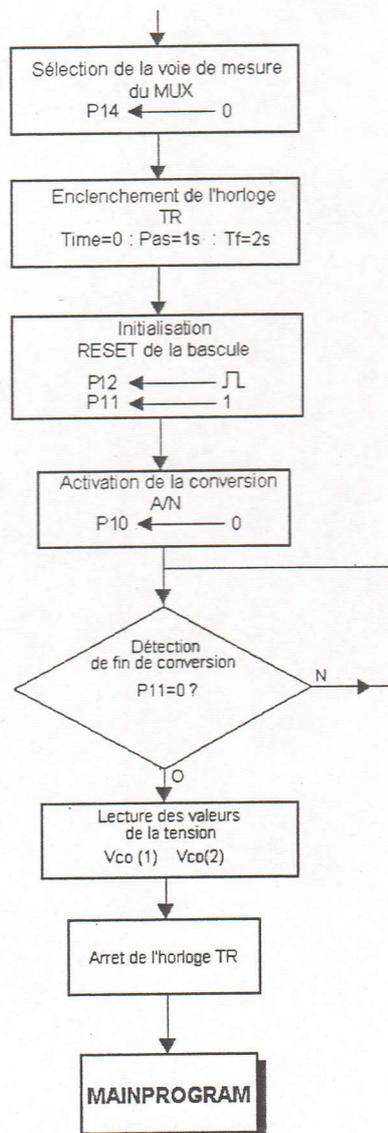


Figure 3.8 : Organigramme de la routine 'START-PV'

3.2.3. Routine 'UPDATE'

L'organigramme de la routine 'UPDATE' est donné en figure 3.9.

La tâche de fond de cette routine est la mise à jour de la valeur de l'état de charge SOC de la batterie. Les étapes d'exécution de cette routine sont similaires à celle de la routine START-PV, à l'exception de la période d'échantillonnage qui se diffère. Dans ce cas, la mesure doit s'effectuer à la première et la cinquième minute. Une fois les données sont prêtes, l'horloge TR s'arrête et remise à zéro, le SOC sera évalué et cette routine se termine par retour au programme principal 'MAINPROGRAM'

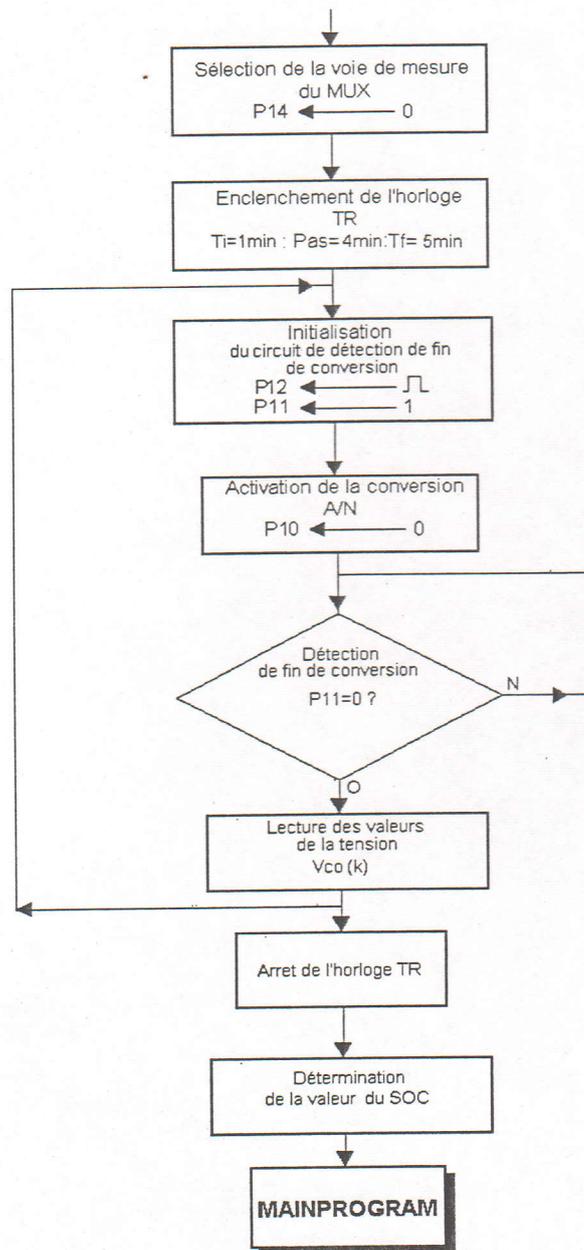


Figure 3.9 : Organigramme de la routine UPDATE

3.2.4. Routine 'CHARGE-DISCHARGE'

La figure 3.10 représente l'organigramme de la routine 'CHARGE-DISCHARGE'.

La principale tâche confiée à cette routine est la mesure du courant de la batterie à chaque seconde et l'évaluation du SOC pour les deux processus de charge ou de décharge.

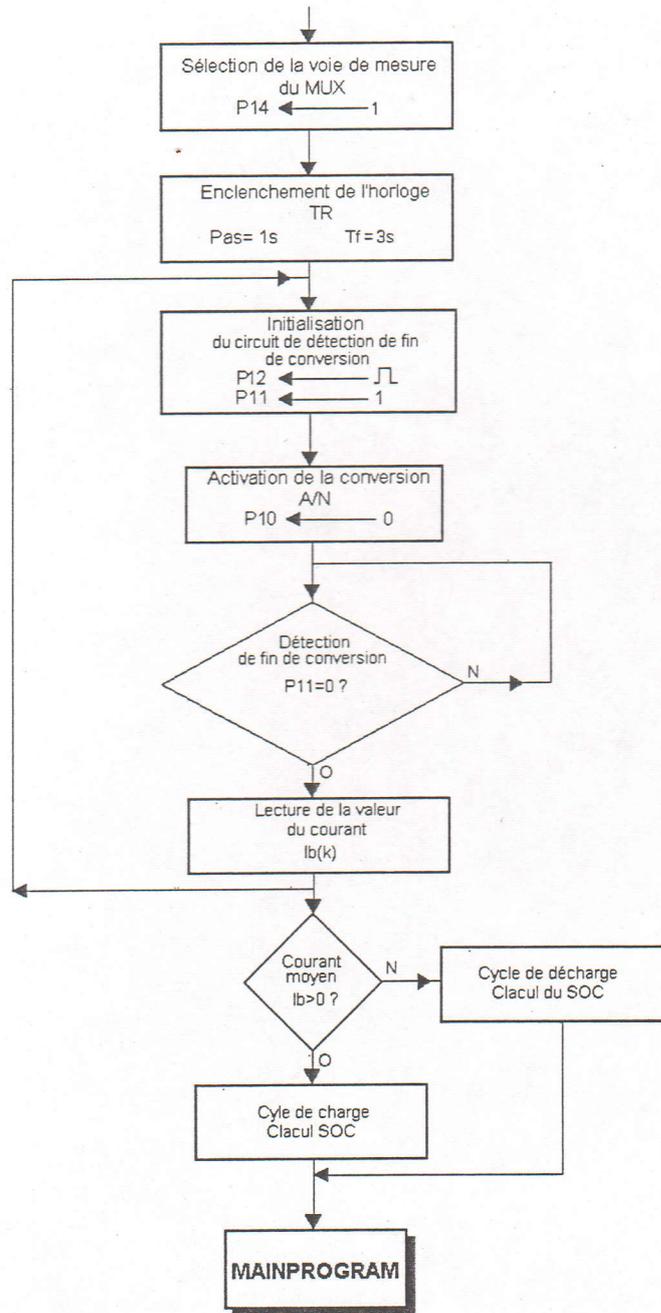


Figure 3.10 : Organigramme de la routine 'CHARGE-DISCHARGE'



4. CONCLUSION

Nous avons effectué l'implémentation matérielle de la stratégie de régulation et de contrôle développé à cet effet par la mise au point d'un dispositif électronique dont le cœur est le microcontrôleur est de type AH Basic 8052, à des fins d'étudier le comportement de la batterie dans le système photovoltaïque.

Le programme de gestion de l'unité de contrôle est élaboré en utilisant l'interpréteur basic du microcontrôleur. Ce programme est structuré en un programme principal avec trois routines complémentaires.

Dans l'unité de régulation, la technique de commande en un seul cycle a été implémentée.

Notre dispositif finalisé est à structure modulaire comprend les deux unités mentionnées précédemment.

L'étude expérimentale de ce dispositif est présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

EXPERIMENTATION ET RESULTATS

1. INTRODUCTION

L'objet de ce chapitre consiste en la mise en œuvre expérimentale du dispositif de régulation et de contrôle de l'état de charge 'SOC' mis au point.

La présente étude expérimentale porte sur deux tests distincts :

- test de l'unité de régulation 'MPPT' afin de vérifier la validité de son fonctionnement,
- test du dispositif de régulation et de contrôle en entier sur banc d'essai comportant un système photovoltaïque autonome de faible puissance.

Ce chapitre présente également les principaux résultats expérimentaux de notre système de régulation et de contrôle.

2. TEST DE L'UNITE DE REGULATION 'MPPT'

2.1. Description du montage expérimental

Afin de valider le fonctionnement de l'unité de régulation 'MPPT' (poursuite effective de la tension de référence), un montage expérimental illustré par la figure 4.1 a été réalisé au sein du laboratoire photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables (Alger, Algérie).

Le montage expérimental comporte les éléments :

- Une source de tension stabilisée réglable,
- Une Interface servant de convertisseur DC/DC 'hacheur' entre la source de tension et l'utilisation (charge). Le hacheur est simulé par un simple transistor bipolaire,
- L'utilisation est une charge résistive connectée à la sortie du hacheur.

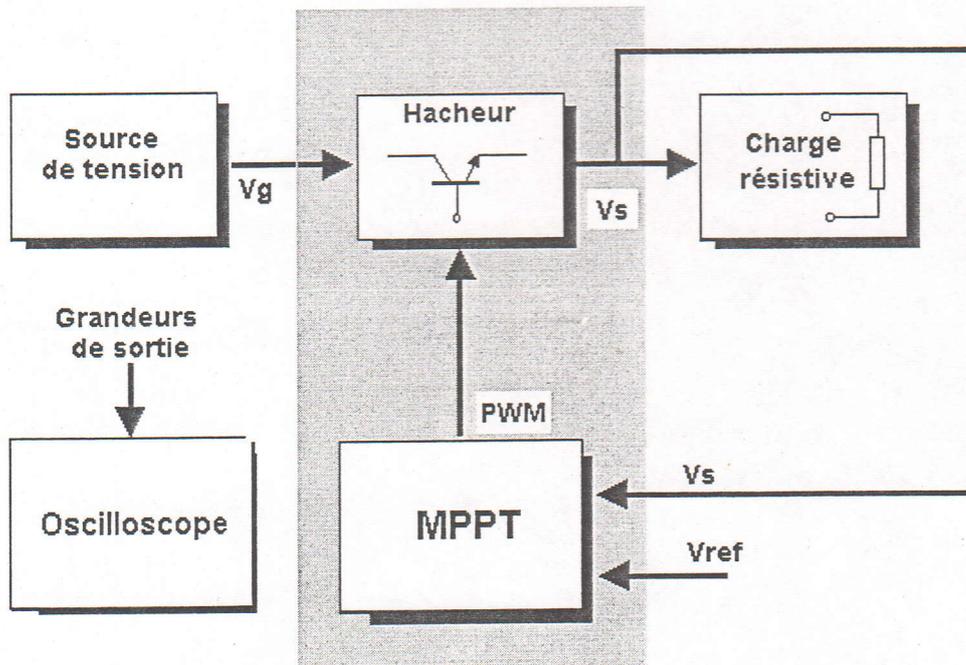


Figure 4.1 : Schéma synoptique du dispositif expérimental

2.2. Résultats et discussions

Pour connaissance significative des performances de notre unité de régulation, quant à la poursuite de la tension de référence, deux cas de figure ont été envisagés, à savoir :

Dans le premier cas étudié expérimentalement, les paramètres caractéristiques sont les suivants : la tension d'entrée v_g et celle de la référence v_{ref} sont maintenues constantes et ont pour valeurs respectives, 12 et 8 volts.

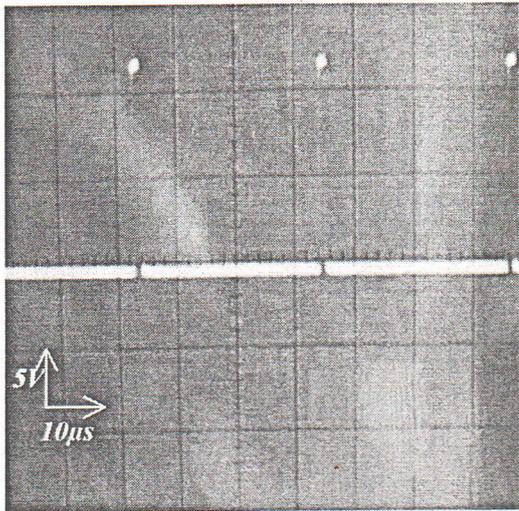
Tandis que dans le deuxième cas étudié expérimentalement, les paramètres caractéristiques concernant les diverses tensions sont les suivants : pour la tension d'entrée, elle est maintenue constante ($v_g = 12$ V), tandis que celle de la référence est variable ($v_{ref} = 5 + \sin(2\pi ft)$, $f = 15$ kHz).

Les résultats de cette étude expérimentale sont représentés en figures 4.2 et 4.3.

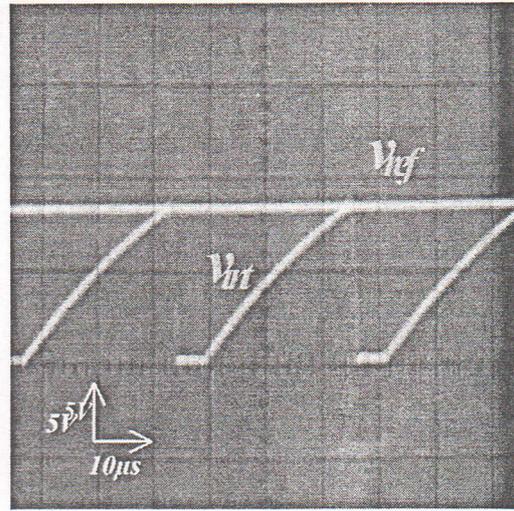
L'analyse des résultats expérimentaux obtenus pour la technique OCC de notre système, illustrés en figures 4.2 et 4.3 montre une similitude avec les résultats obtenus par la simulation. Le suivi de la tension de référence est également effectuée d'une manière convenable dans les deux cas étudiés. La valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur (tension aux bornes de la charge résistive) est également atteinte en un seul cycle de commutation, grâce aux modulations par la référence du signal de commande.

L'analyse de ces résultats confirme que cette technique de commande est bien adaptée à notre application, avec notamment des avantages suivants :

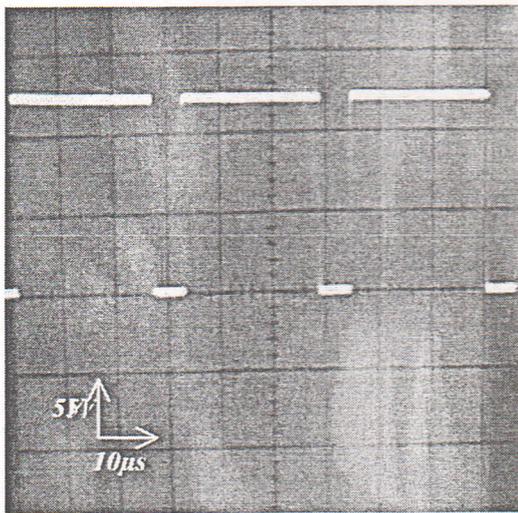
- le régime transitoire de la tension de sortie s'établit en un seul cycle,
- la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur est capable de suivre la valeur de référence,
- l'erreur entre la tension de charge et de la tension de référence, au régime permanent, est pratiquement nulle.



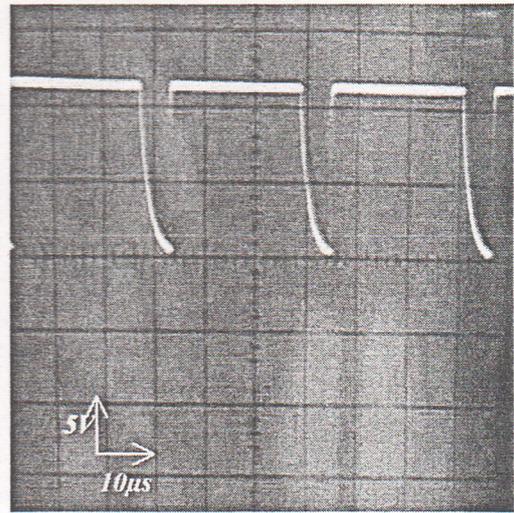
a) Signal d'horloge



b) Tension à la sortie de l'intégrateur

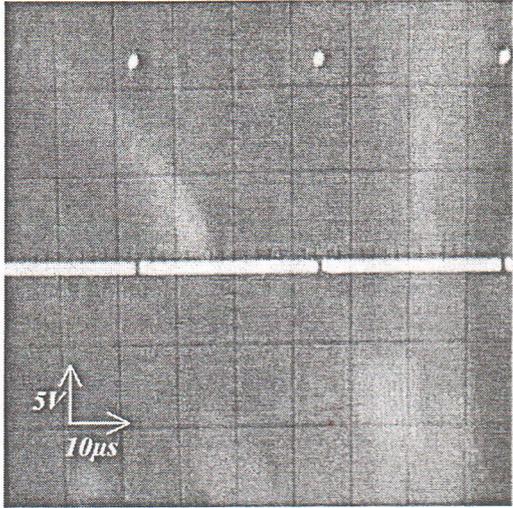


c) Signal de commande

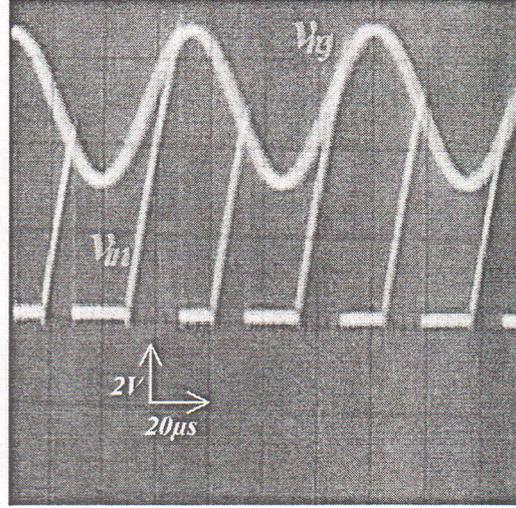


d) Tension de charge

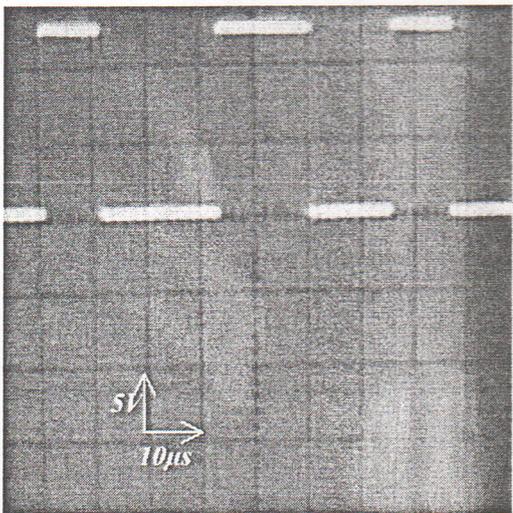
Figure 4.2 : Différents signaux obtenus pour les tensions v_g constante et v_{ref} constante



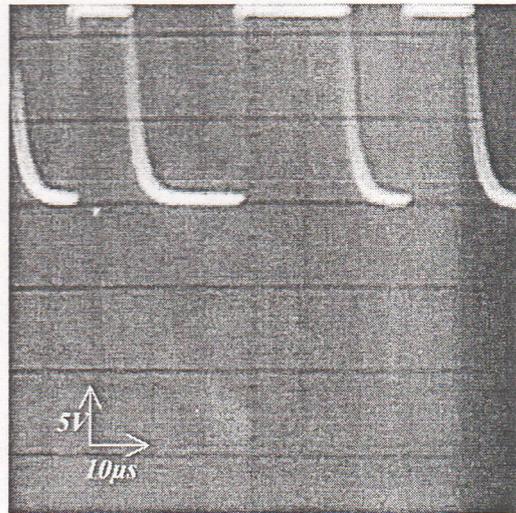
a) Signal d'horloge



b) Tension à la sortie de l'intégrateur



c) Signal de commande



d) Tension de charge

Figure 4.3 : Différents signaux obtenus pour les tensions v_g constante et v_{ref} variable

3. TEST DU DISPOSITIF SUR BANC D'ESSAI

Après avoir vérifié le bon fonctionnement du dispositif électronique mis au point, nous avons mis en place un banc d'essai expérimental comprenant le système photovoltaïque de faible puissance auquel est intégré notre dispositif de régulation et contrôle. Ceci est réalisé au niveau du Laboratoire Photovoltaïque du Centre.

L'objectif principal de cette partie d'expérimentation est de s'assurer le fonctionnement adéquat du dispositif dans le système, et plus particulièrement au contrôle de l'état de charge de la batterie dans les régimes de charge et de décharge.

En vue de vérifier les relevés de l'état de charge par notre dispositif, nous avons installé une acquisition de données (enregistreur $\mu\text{p-MS}$) pour la mesure de l'état de charge et cela à partir de la valeur du courant débitée ou reçue par la batterie. Le but de ces manipulations consistent à une comparaison significative entre les données mesurées par notre dispositif ' $\mu\text{c-RC}$ ' et les données mesurées à l'aide de l'enregistreur ' $\mu\text{p-MS}$ '.

Etant donné que notre dispositif est muni d'une unité de régulation 'MPPT' pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque à son point de puissance maximal et vu la non disponibilité d'une cellule pilote pour obtenir la tension de référence (tension optimale du générateur), nous avons opté pour une tension de référence de 14.8 V, correspondante à la tension de fin de charge de la batterie, recommandée par le constructeur. Le régime de charge s'effectue donc à une tension constante par le biais de l'unité de régulation travaillant en régulateur de tension.

Dans ces tests, les résultats expérimentaux portent principalement sur l'état de charge de la batterie 'SOC' dans le système photovoltaïque. Le contrôle de l'état de charge 'SOC' de la batterie est donc assurée par l'unité de contrôle, qui mesure les quantités d'électricité 'ampères-heures' entrant ou sortant de l'élément de batterie, puis effectue le calcul de l'état de charge et des générations de signaux logiques pour la commande des interrupteurs faisant la liaison générateur-batterie et batterie-utilisation, suivant l'algorithme numérique implémenté.

3. 1. Description du banc d'essai

Le banc d'essai expérimental réalisé est illustré par le schéma synoptique de la figure 4.4 et sur la photographie de la figure 4.5.

Ce banc d'essai se compose des éléments suivants :

- un système photovoltaïque,
- une acquisition des données (enregistreur ' $\mu\text{p-MS}$ '),
- et le dispositif de régulation et contrôle développé ' $\mu\text{c-RC}$ '.

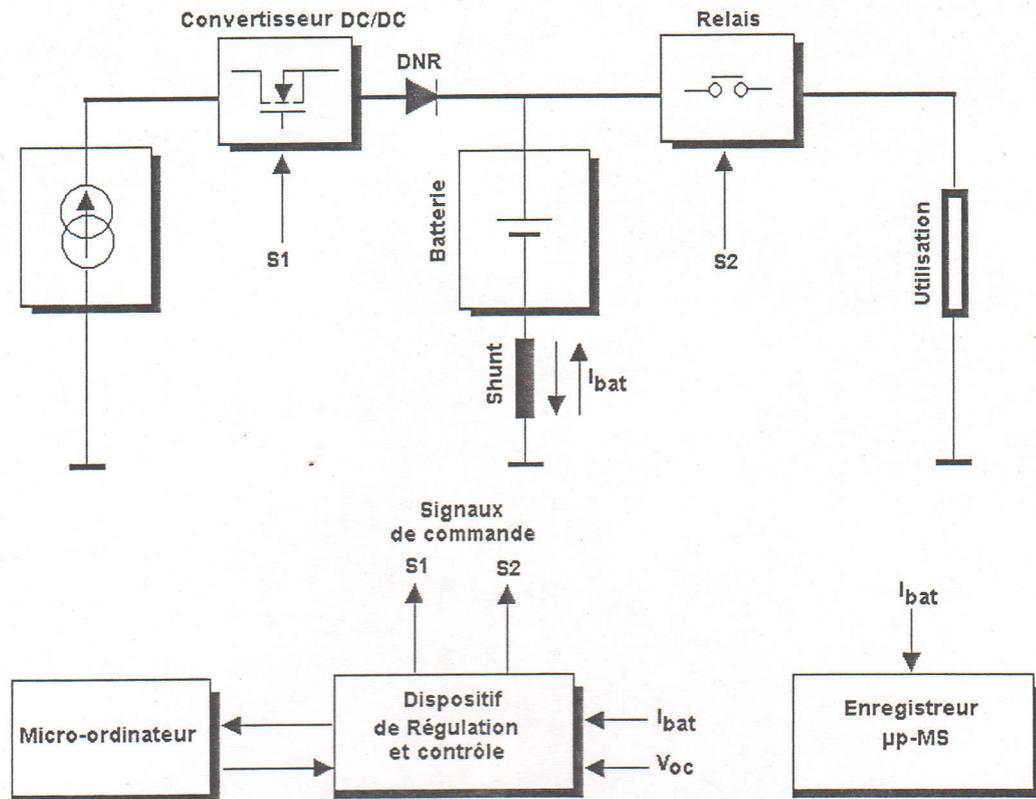


Figure 4.4 : Schéma synoptique du banc d'essai

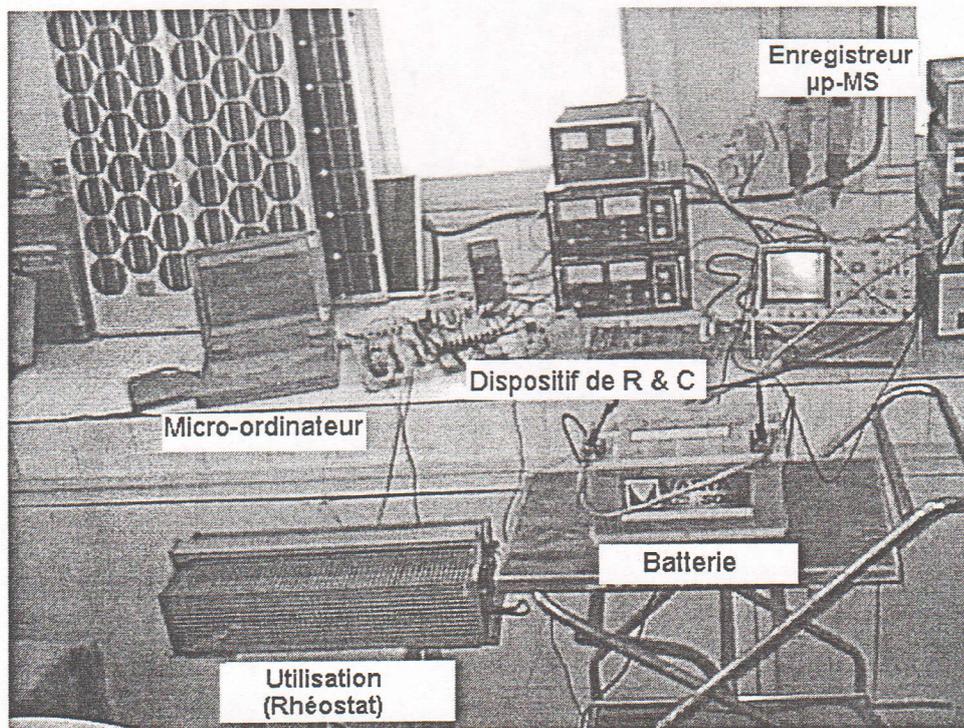


Figure 4.5 : Vue d'ensemble des équipements constituant le banc d'essai

- Le système photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque (figure 4.6) est composé de deux modules photovoltaïques 'UDTS-50' branchés en parallèle (36 cellules carrées au silicium monocristallin connectées en série) avec une puissance nominale de 50 Wc au conditions standards 'STC' (1000W/m^2 , 25°C et AM1.5) chacun.

Il est monté sur une structure porteuse, incliné d'un angle égal à la latitude du lieu (36.8°) et orienté plein sud.

Les caractéristiques de chaque module sont les suivantes :

- Puissance maximale P_{max} : 50W,
- Tension de circuit-ouvert V_{oc} : 20.6V
- Courant de court-circuit I_{cc} : 3.1A,
- Rendement η : 11.6%.

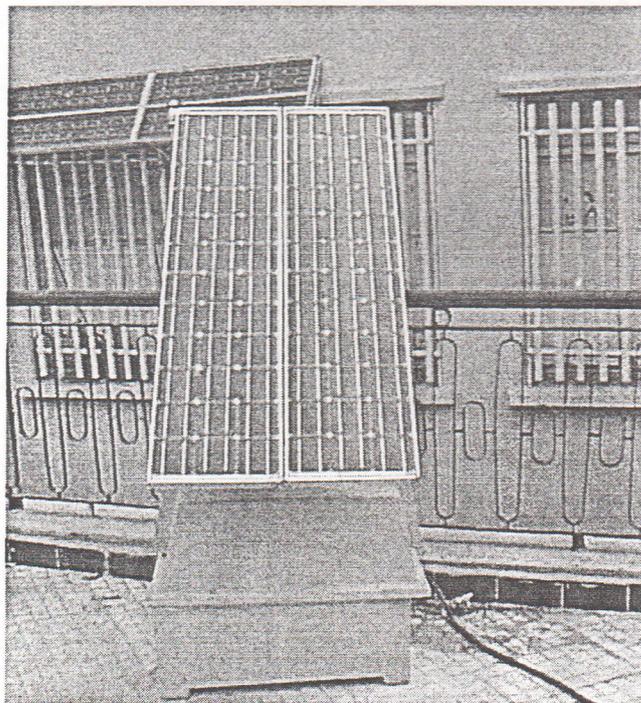


Figure 4.6 : Le générateur photovoltaïque

La batterie de stockage utilisée dans notre système photovoltaïque est une batterie de type monobloc stationnaire Varta Solar. Ses spécifications techniques sont les suivantes :

- Tension nominale : 12V
- Capacité nominale : 100Ah
- Courant nominal : 1A
- Densité de l'électrolyte : 1.23 kg/l
- Tension de fin de charge : 14.8V (20°C),
- Tension de fin de charge : 10.5V (20°C).
- La caractéristique de l'état de charge en fonction de la tension de circuit-ouvert est donnée par l'équation linéaire $SOC=92.97*V_{oc}-1064.60$ représentée en figure 4.7

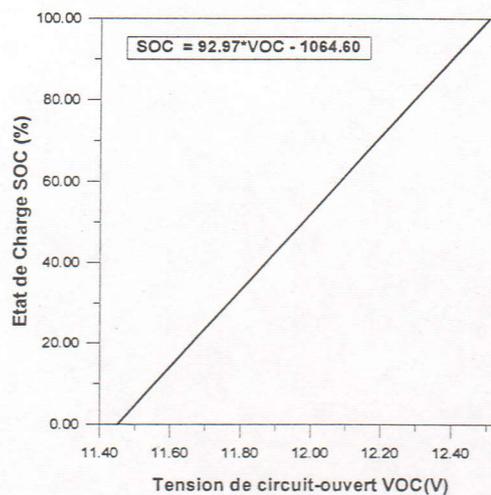


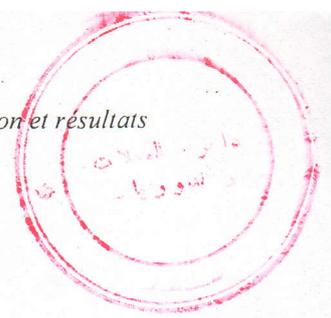
Figure 4.7 : Caractéristique 'SOC=f(V_{oc})'

La charge électrique utilisée dans notre système est une charge résistive. Dans le montage expérimental, nous avons utilisé un rhéostat de 300Ω, 1000W.

La liaison générateur-batterie est assurée par un MOSFET 'IRF 250' placé en parallèle, servant de convertisseur DC/DC et qui assure le régime de charge de la batterie. La commande de celui-ci est obtenue grâce à l'unité de régulation. Tandis qu'un relais électromagnétique 'SDS-SP2 DC12V' est placé en aval de la batterie faisant office de connexion batterie-utilisation. Quant à l'unité de contrôle, elle génère les deux signaux logiques, soit pour l'inhibition du fonctionnement de l'unité de régulation, soit pour la commande du relais.

- L'acquisition des données 'µp-MS'

Pour évaluer l'état de charge de la batterie 'SOC', un enregistreur (µp-MS) a été installé sur banc d'essai permettant la mesure des quantités d'électricité 'ampères-heures' à l'entrée et à la sortie de la batterie. La mesure du courant est effectuée par un shunt (10A/0.1V)



- Le dispositif de régulation et contrôle 'µc-RC'

Le conditionnement de la puissance est assuré par le dispositif mis au point. Le pilotage de ce dispositif est effectué grâce à un programme de gestion développé géré par un micro-ordinateur qui est connecté directement à l'unité de contrôle de notre dispositif.

3. 3. Résultats et discussions

Dans cette partie expérimentale, deux tests ont été effectués pour vérifier la performance de notre dispositif de régulation et contrôle 'µc-RC'. Les tests sont relatifs aux deux processus de charge et de décharge de la batterie.

Processus de charge

Dans ce cas, seule la batterie est connectée. Le programme de gestion est envoyé dans l'unité de contrôle par un micro-ordinateur. Après exécution du programme, l'unité de contrôle envoie deux signaux logiques de niveau bas '0' mettant la batterie au repos après inhibition de l'unité de régulation et de la déconnexion de l'utilisation, et valide le module d'acquisition pour un relevé de la tension de circuit-ouvert nécessaire à la détermination de l'état de charge initial de la batterie. La valeur du 'SOC' initial affiché sur micro-ordinateur est de 35.6 %. Après vérification de ce niveau du 'SOC', lequel est supérieur au 'SOC_{min}' (30 %), l'unité de régulation se met donc en fonctionnement par un niveau logique haut '1' émis par l'unité de contrôle. Plusieurs valeurs du 'SOC' ont été relevées à différents pas horaires.

Parallèlement et dans le même temps horaire, des quantités d'électricité 'ampères-heures' donnés par l'enregistreur µp-MS ont été relevées. Ensuite, nous avons procédé aux divers états de charge correspondants.

Le niveau le plus élevé du 'SOC' enregistré atteint est d'environ 80 %.

Les résultats de comparaison entre le 'SOC' mesuré par notre dispositif 'µc-RC' et celui mesuré par l'enregistreur 'µp-MS' sont donnés par la figure 4.8. Nous remarquons que les mesures respectives données sont proches l'une de l'autre. Le lieu de ces points relevés s'apparente à la bissectrice avec notamment une erreur relative moyenne de l'ordre de 4.01 %. Les résultats issus de ce test sont appréciables.

Processus de décharge

Dans ce cas, le courant de décharge est maintenu constant, soit 03 ampères, en connectant la charge résistive (rhéostat 300Ω, 1000W). Tandis que le générateur photovoltaïque est déconnecté.

La procédure de fonctionnement du dispositif utilisée est similaire à celle préconisée précédemment 'processus de charge'. La valeur du 'SOC' initial affiché est d'environ 80 %.

Plusieurs points de mesures du 'SOC' à différents pas horaires ont été relevés par les deux dispositifs respectifs. La figure 4.9 représente la comparaison entre les valeurs mesurées par notre dispositif ' μ c-RC' et celles mesurées par l'enregistreur ' μ p-MS'. Notons que dans ce cas qu'il y a une meilleure concordance entre les deux mesures, avec une erreur relative moyenne moindre ($E_r = 2.23 \%$).

4. CONCLUSION

A partir de ces résultats pratiques obtenus, nous pouvons donner certaines remarques concernant le fonctionnement de notre dispositif développé, à savoir :

- Le régime de charge s'effectue à tension constante, grâce au bon fonctionnement de l'unité de régulation, prouvant que la technique utilisée 'Commande en un seul cycle - OCC' est performante.
- Le contrôle automatique de l'état de charge de la batterie 'SOC' au cours des deux processus de charge et de décharge est d'une finesse, grâce au programme de gestion élaboré.

Afin d'affiner et de valider ces résultats pratiques obtenus, une campagne de mesures plus importante sur une période plus longue est nécessaire, et cela en tenant compte des nombreux autres considérations influentes, telles que la mise en place d'une cellule pilote pour le fonctionnement du MPPT, l'utilisation de diverses charges à alimenter (par exemple: onduleur, ..).

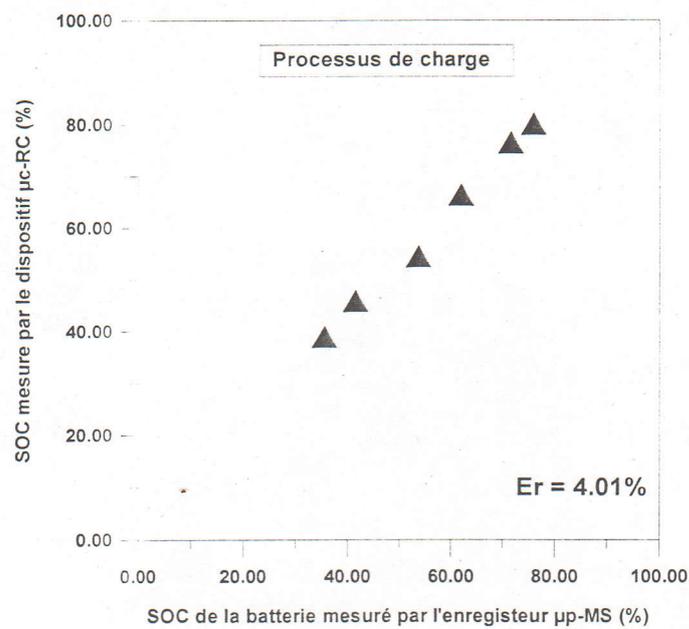


Figure 4.8 : Etat de charge mesuré lors du processus de charge

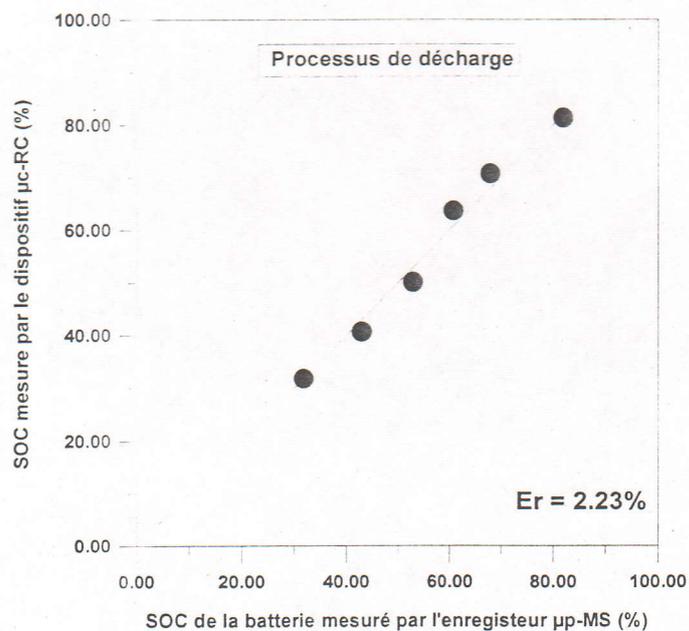


Figure 4.9 : Etat de charge de la batterie mesuré durant le processus de décharge

CONCLUSION

Dans ce travail, le concept et la théorie d'une nouvelle stratégie de régulation et de contrôle de l'état de charge de la batterie dans un système photovoltaïque autonome sont présentés. Une implémentation matérielle des techniques de régulation et de contrôle a été réalisée.

Cette stratégie proposée va à l'encontre de la plupart des stratégies, qui s'appuient sur la tension mesurée aux bornes de la batterie comme étant la seule indication pour en assurer les fonctions de régulation et de contrôle des limites de charge et de décharge. En effet, la tension n'est pas en outre significative, car plusieurs autres facteurs interviennent tels que : le courant de cyclage (charge et décharge), les régimes de charge et de décharge, la température, etc. De plus, certaines stratégies ne tiennent pas compte du problème de l'adaptation de la batterie au générateur pour extraire la totalité de la puissance fournie par le générateur.

Pour répondre aux exigences de la batterie, une nouvelle stratégie de régulation et de contrôle de l'état de charge, qui offre à la batterie un profil idéal de la tension et du courant de charge et de fin de charge, a été ainsi développée.

La stratégie développée repose sur deux techniques bien distinctes :

- Une technique de régulation consiste à réguler la tension de la batterie à la tension optimale du générateur photovoltaïque, permettant le couplage optimal 'générateur-batterie'. Elle se base sur une commande analogique appelée commande en un seul cycle 'One cycle Control' d'un convertisseur continu-continu intercalé entre le générateur et la batterie.

Les résultats de l'étude de simulation obtenus montrent que les principaux avantages de cette technique sont :

- Une fiabilité et une robustesse vis à vis des perturbations de la source (générateur photovoltaïque).
- Le régime transitoire s'établit en un seul cycle.
- La valeur moyenne de la tension atteint ainsi la valeur de la référence (tension optimale du générateur) en un seul cycle de commutation.
- Une poursuite idéale de la tension de référence.

- Une technique de contrôle de l'état de charge de la batterie, se basant sur un calcul numérique du rapport de l'énergie restituée ou emmagasinée et de la capacité maximale, à l'aide de deux méthodes combinées 'mesure coulombmétrique' et 'mesure de la tension de circuit-ouvert'. Une approche de minimisation du temps de stabilisation de la tension de circuit-ouvert a été introduite, rendant la mesure de cette dernière plus pratique.

La mise en œuvre pratique de cette stratégie de régulation et de contrôle est concrétisée par le développement et la réalisation d'un dispositif électronique, de structure modulaire, constitué de deux principales unités : - unité de régulation 'MPPT' à base de composants de circuits analogiques, - unité de contrôle 'Contrôleur de Charge' à base de microcontrôleur 8052 AH-BASIC où le programme de la gestion de l'état de charge de la batterie a été implémentée. Ce programme, écrit en langage basic, est architecturé de telle façon qu'il puisse être compréhensible à tout utilisateur.

La vérification de la validité du fonctionnement du dispositif réalisé est satisfaisante, que ce soit pour les signaux de commande générés et sur banc d'essai.

De ce travail, pour une amélioration significative de ce dispositif, nous préconisons ce qui suit :

- L'introduction du programme de gestion dans une mémoire 'EPROM' ou écrit en langage machine 'Assembleur', rendant ainsi le dispositif d'une autonomie certaine.
- Le choix d'un convertisseur DC/DC de topologie appropriée, par le dimensionnement adéquat des éléments le composant 'Interrupteur, Filtre'.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] E. Lorenzo, 'Electricidad Solar, Ingeniera de los Siestemas Fotovoltaicos', Universidad Politécnica de Madrid, Espana, 1994.
- [2] J. B. Copetti, 'Modelado de Acumuladores de Plomo-Acido para Aplicaciones Fotovoltaicas', Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1993
- [3] D. Meyer and S. Biscaglia, 'Use of the Modeling of Lead-Acid Battery Operation for the Development of State of Charge Meter', 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 8-12 April, Lisbon, Portugal 1991.
- [4] K. Kanematsu, A. Hori and T. Abe, 'Dynamic Characteristic Analysis for the Inverter / Battery Combined Power Conditioning', IEEE, 1985.
- [5] J. B. Copetti, E. Lorenzo and F. Chenlo, 'A General Battery Model for PV System Simulation', Progress in PV: Research and Applications, Vol. 1, pp. 283-292, (1993).
- [6] J. N. Avarisiotis, 'The Efficient Exploitation of Photovoltaic', Solar Cells, N°14, pp. 261-279, 1985.
- [7] A. R. Millner, 'Improved Photovoltaic Battery Chargers for Lower maintenace and higher efficiency', IEEE Photovoltaic Conversion, 1982.
- [8] A. Illicto, A. Previ, S. Guastella and A. Pappalardo, 'Performance of Different Types of Battery Charge Regulators in Stand-Alone PV System', 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 8-12 April, Lisbon, Portugal, 1991.
- [9] W. I. Bower and J. F. Dunlop, 'Performance of Battery Charge Controllers : An Interim Test Report', IEEE Transactions on Power Electronics, 1990.
- [10] T. Fogelman, 'Installations Photovoltaïques dans l'habitat Isolé', Edisud, Aix-en-Provence, 1983
- [11] S. A. Pressas and V. Makios, 'A Shunt Switch Pulse Width Modulated Photovoltaic Battery Charger Regulator for the AGIA Roumeli - Crete 50kWp Stand Alone PV plant', 9th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1989.
- [12] H. Mashleni and X. F. Carlese, 'Microcontroller-Based Charge Controller Stand-Alone Photovoltaic Systems', Solar Energy, Vol. 4, pp. 225-230, 1997.
- [13] S. A. Pressas and V Makios, 'A Reliable Photovoltaic Battery Charge Regulator with Ideal V_B, I_B vs t Profile', 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 8-12 April, Lisbon, Portugal 1991.
- [14] J. N. Avarisiotis, 'A Power Controller for Autonomous Photovoltaic systems', Solar Cells, N°22, pp.175-186, 1985.
- [15] J. Jalade, ' Maximum Power Point Tracking For Photovoltaic Array', 5th PSEC, 1983.
- [16] M. Abou El Ela and J. A. Roger, 'Optimization of the Function of a Photovoltaic Array using a Feedback Control System', Solar Cells, N°13, pp. 107-119, 1984.
- [17] M. Barlaud, D. de Fornel, M. Gauverit and J. P. Requier, 'Commande Optimale d'un Générateur Photovoltaïque - Convertisseur Statique - Récepteur', Revue Physique Appliquée, N°19, pp. 905-915, Octobre 1984.
- [18] C. Boisvineau, M. Nougared and J. Perard, 'Optimisation du Fonctionnement d'un Générateur Photovoltaïque : Asservissement Extrémal de la Puissance', Revue Physique Appliquée, N°17, pp. 329-336, Mai 1982.

- [19] M. Barlaud, D. Pradal and J. P. Réquier, 'Recherche de la Puissance Optimale Délivrée par un Générateur Photovoltaïque à l'Aide d'un Dispositif Microprogrammé', Entropie, N°95, 1980.
- [20] S. M. Alghuwainem, 'Speed Control of a PV Powered DC Motor Driving a Self-Excited 3-Phase Induction Generator for Maximum Utilization Efficiency', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, N°4, December 1996.
- [21] V. Arcidiancono, S. Corsi and L. Lambri, 'Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power Plants', IEEE, 1982.
- [22] I. H. Altas and A. M. Sharaf, 'A Novel On-line MPP Search Algorithm for PV Arrays', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.11, N°4, December 1996.
- [23] G. W. Hart, 'Experimental Tests of Open-loop Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Arrays', Solar cells, Vol.13, N°6, pp. 185-195, 1994.
- [24] K. M. Smedley and S. Cuk, 'One Cycle Control of Switching Converters', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, N°6, pp.265-633, November 1995.
- [25] K. M. Smedley and S. Cuk, 'Dynamics of One Cycle Controlled Cuk Converter', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, N°6, pp.634-639, November 1995.
- [26] M. Drif, A. Malek and F. Krim, 'Nouvelle Technique de Commande non Linéaire d'un Convertisseur CC/CC pour Applications Photovoltaïques', Revue sur les Energies Renouvelables, Vol. 1, N°2, pp. 65-77, 1998.
- [27] 'SIMULINK, Dynamic System Simulation Software', User's guide, For the X Windows System, the Mathworks Inc., March 1992.
- [28] S. Colombi, 'Design and Simulation of Mechatronic Application and Power Electronic Systems with Matlab / Simulink', EPFL - LEI Lausanne, June 1996.
- [29] G. C. Seeling Hochmuth, 'A Combined Optimization Concept for the Design and Operation Strategy of Hybrid-PV Energy Systems', Solar Energy, Vol 1, N°2, pp. 77-87, 1997
- [30] J. H. Aylor, A. Thienne and B. W. Jonhson, 'A Battery State-of-Charge Indicator for Electric Wheelchairs', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 39, N°5, pp. 398-409, October 1995.
- [31] K. Short, 'An adaptive battery monitor', Masters Thesis in Electrical Engineering, University of Virginia, Jan 1986.
- [32] B. Odant, 'Microcontrôleurs 8051 et 8052 : Description et Mise en Œuvre', Dunod, Paris, 1993.
- [33] J. Steeman, 'Automates Programmables en Basic', Elector, 1^{ère} édition, Mars 1995.
- [34] P. Gucher, J. A. Roger, S. Massaad, J. Posbic and J. Pivot, 'Mismatch Between Batteries and Two Module Types PV arrays Interest of DC-DC Converters', 4th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 10-14 May, 1982.
- [35] W. R. Anis, 'An Alternative Design of a Novel Battery Voltage Regulator for PV Systems', Solar Energy Materials and Solar Cells, N°28, pp.175-186, 1992.
- [36] J. F. Schaefer, 'Some Results Regarding Stability of Photovoltaic Maximum-Power-Point-Tracking DC/DC Converter', IEEE Transactions on Power Electronics, 1985.
- [37] D. Meyer and S. Biscaglia, 'Development and Evaluation of 20 Watt MPP Tracking Charge Controller for PV Supplied Remote Monitoring Stations', 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 8-12 April, Lisbon, Portugal 1991.
- [38] A. T. Veltman, R. Klockner, K. K. W. Geers, 'Equipment for Testing of Maximum Power point Trackers under Variable, Programmable Conditions', 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 8-12 April, Lisbon, Portugal 1991.



- [39] A. Jossen, A. Bosch, H. P. Hones and H. Kari, 'Battery Control Unit State Of Charge Indicator', 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 8-12 April, Lisbon, Portugal 1991.
- [40] Z. M. Salameh and W. A. Lynch, 'Single Dual Priority Regulator for Photovoltaic Systems', Solar Energy, Vol 48, N°6, pp. 149-351, 1992
- [41] Z. M. Salameh and D. Taylor, 'Step-up Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays', Solar Energy, Vol. 44, N°11, pp. 57-61, 1990
- [42] K. Khouzam, L. Khouzam and P. Groumpos, 'Optimum Matching of Ohmic Loads to the photovoltaic Arrays', Solar Energy, Vol.46, N°2, pp. 101-108, 1991
- [43] C. Lishou, C. Kraif, G. Sow and L. Protin, 'Real Time Optimization of the Photovoltaic Geberator Working and Energy Transfer Management from the Specialized Processors' 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 8-12 April, Lisbon, Portugal 1991.
- [44] P. Groumpos and G. Pagegeorgioue, 'An Optimum Load Management Strategy for Stand Alone Photovoltaic Power Systems', Solar Energy, Vol.46, N°2, pp. 121-128, 1991.
- [45] J. N. Avarisiotis, S. Tsitomeneas and C. Caroubalos, 'A Novel Maximum Power Point Tracking System Employing Phase Comparison Techniques', 5th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1983.
- [46] J. B. Copetti, F. Chenlo and E. Lorenzo, 'Comparaison between Charge and Discharge Batteries Models and Real Data for PV Applications', 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 12-16 October, 1992.
- [47] M. Janitsch, M. Real, H. Whitaker, G. Blasser, P. Kremer and C. W. G. Verheve, 'Measurment of PV Maximum, Power Point Tracking Performance', 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelone, 30 June - 4 july, 1997.
- [48] P. Maranesi, 'Small-Signal Circuit Modeling in The Frequecy-Domain by Computer-Aided Time-Domain Simulation', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 7, N°1, January 1992.
- [49] J. Bordonau and J. Peracula, 'Alternative Photovoltaic Energy Control by 16 Bit microprocessors : Performances and Time Constraints', European Space Power Conference, Florence, Italy, 2-6 September 1991.
- [50] J. Peracula, J. Bordonau and J. J. Cansellas, 'Microcomputer Control of DC/DC converter for Photovoltaic Application', IEEE, 1991.
- [51] M. Orgeret, 'Les Piles Solaires : le Composant et ses Applications', Masson, Paris, 1985.
- [52] A. Laugier and J. A. Roger, 'Les photopiles solaires - du Matériau au Dispositif - du Dispositif aux Applications', Technique et Documentation, Paris, 1981.
- [53] I. de Beruete and L. Serrano Iribarnegaray, 'Central Solar Fotovoltaico - Circuito de Commando para Seguimiento del Punto de Maxima Potencia', Energetica, mundo Electronica, N°109, 1989.

ANNEXE 1

PROGRAMME DE GESTION DE L'UNITE DE CONTROLE

```
10 REM *****
20 REM                                     MAINPROGRAM
30 REM
40 REM
50 REM
60 REM
30 REM *****
40 DIM VOC(4), IB(10), SOC(20)
20 PORT1 = PORT1.AND.03FH                :REM MODE0 (SW1(0N),SW(0FF))
30 GOSUB 10030                          :REM Appel de la routine START-PV
40 IF VOC(1) <> V(2) THEN 90
50 SOC = K2 * VOC(1) + K3
60 IF SOC < .3 THEN PORT1 = PORT1.AND.0FH : GOTO 90
70 IF .3 < SOC < .35 THEN PORT1 = PORT1.OR.07H : GOSUB 30030 : GOTO 60 :REM Appel CHAR-DISC
80 IF .35 < SOC < 1 THEN PORT1 = PORT1.OR.0FFH : GOSUB 30030 : GOTO 60 :REM Appel CHAR-DISC
80 IF SOC > 1 THEN PORT1 = PORT1.AND.0BFH : GOSUB 30030 : GOTO 60 :REM Appel CHAR-DISC
90 GOSUB 20030                          :REM Routine UPDATE
100 GOTO 60
10000 REM *****
10010 REM                                ROUTINE START-PV
10020 REM
10030 REM
10040 REM
10050 REM
10020 REM *****
10030 PORT1 = PORT1.AND.0EFH             :REM Sélection de la voie de mesure de la tension P1.4=0
10040 PORT1 = PORT1.AND.0FBH           :REM RAZ de la bascule P1.2
100150 PORT1 = PORT1.OR.06H
10060 TIME = 0 : CLOCK1 : ON TIME 1, 10080 : DO :REM Enclenchement de l'horloge TR
10070 WHILE TIME < 2
10080 CLOCK0 : CLEAR I                 :REM Arrêt de l'horloge TR
10090 RETURN                          :REM Retour au programme principal
10080 T = TIME
10100 PORT1 = PORT1.AND.0FBH           :REM RAZ de la bascule P1.2
10110 PORT1 = PORT1.OR.06H
10120 PORT1 = PORT1.AND.0FEH           :REM Début de la conversion A/N P1.0=0
```

```

10130 C1=PORT1.OR.0FDH :REM Détection de fin de conversion P1.1=0
10140 IF C1<>0FDH THEN 10140
10150 MES1=XBY(4000H) :REM Lecture de la donnée
10160 I=I+1
10180 VOC(I)=(MES-128)*.04*K1 :REM Conversion en volt
10190 IF I=2 THEN 10200
10200 PORT1=PORT1.OR.01H :REM Réactivation de la conversion P1.0=1
10210 PORT1 = PORT1.AND.0FBH :REM RAZ de la bascule
10220 PORT1 = PORT1.OR.06H
10230 ONTIME TIME+1, 10080 : REM Incrémentation
10240 RETI
10000 REM *****
10010 REM ROUTINE UPDATE
10020 REM
10030 REM
10040 REM
10050 REM
10060 REM
10020 REM *****
10030 PORT1 = PORT1.AND.0EFH :REM Sélection de la voie de mesure de la tension P1.4=0
10040 PORT1 = PORT1.AND.0FBH :REM RAZ de la bascule P1.2
10050 PORT1 = PORT1.OR.06H
10060 TIME = 0: CLOCK1:ONTIME 60, 10080 : DO :REM Enclenchement de l'horloge TR
10070 WHILE TIME < 5*60
10080 CLOCK0 : CLEAR I : REM Arrêt de l'horloge TR
10090 M=(V (2)-V (1))/.7
10100 VOC=1.64*M+V(1)
10200 SOC=K2*VOC+K3
10090 RETURN :REM Retour au MAINPROGRAM
10080 T=TIME
10100 PORT1 = PORT1.AND.0FBH :REM RAZ de la bascule P1.2
10110 PORT1 = PORT1.OR.06H
10120 PORT1 = PORT1.AND.0FEH :REM Début de la conversion A/N P1.0=0
10130 C1=PORT1.OR.0FDH :REM Détection de fin de conversion P1.1=0
10140 IF C1<>0FDH THEN 10140
10150 MES1=XBY(4000H) :REM Lecture de la donnée
10160 I=I+1
10180 V(I)=(MES-128)*.04*K1 :REM Conversion de la donnée en volt
10190 IF I=2 THEN 10200
10200 PORT1=PORT1.OR.01H :REM Réactivation de la conversion P1.0=1
10210 PORT1 = PORT1.AND.0FBH :REM RAZ de la bascule
10220 PORT1 = PORT1.OR.06H
10230 ONTIME TIME+1, 10080 : REM Incrémentation
10240 RETI
30000 REM *****
30010 REM ROUTINE CHARGE-DISCHARGE
10020 REM
10030 REM
10040 REM
10050 REM
10060 REM
30020 REM *****
30030 PORT1=PORT1.OR. 0FFH :REM Sélection de la voie de mesure du courant
30030 PORT1 = PORT1.AND.0FBH :REM RAZ de la bascule P1.2
30040 PORT1 = PORT1.OR.06H
30050 TIME = T: CLOCK1:ONTIME 1, 30100 : DO :REM Enclenchement de l'horloge TR
30070 WHILE TIME < 4
30300 IF IB<0 THEN SOC=SOC+dT*RC*IB/C :GOTO 30400

```

```
30300 SOC=SOC-dT*IB/C
30400 RETURN REM Rretour au programme principal
30100 T=TIME
30110 PORT1 = PORT1.AND.0FEH :REM Début de la conversion A/N P1.0=0
30140 C2=PORT1.OR.0FDH :REM Détection de fin de conversion P1.1=0
30150 IF C1<>0FDH THEN 10140
30160 MES2=XBY(4000H) :REM Lecture de la donnée
30170 I=I+1
30180 IF MES2>=128 THEN V(I)=(MES2-128)*.04 : GOTO 30200
30190 IF MES2<128 THEN V(I)=-MES2-128*.04/2
30200 V=V+V(I)
30200 IF I=3 THEN VM=V1/3 : IB=K4*VM : I=0 : V=0
30030 PORT1 = PORT1.AND.0FBH :REM RAZ de la bascule P1.2
30040 PORT1 = PORT1.OR.06H
30050 ONTIME TIME+1, 30100
```

LE MICROCONTROLEUR 8052 AH BASIC

1. Le brochage du microcontrôleur 8052 AH-BASIC

T2 / P1.0	□ 1	40	□ VCC
T2EX / P1.1	□ 2	39	□ AD0
PWM OUTPUT / P1.2	□ 3	38	□ AD1
ALE DISABLE / P1.3	□ 4	37	□ AD2
PROGRAM PULSE / P1.4	□ 5	36	□ AD3
PROGRAM ENABLE / P1.5	□ 6	35	□ AD4
DMA ACKNOWLEDGE / P1.6	□ 7	34	□ AD5
LINE PRINTER OUTPUT / P1.7	□ 8	33	□ AD6
RESET	□ 9	32	□ AD7
CONSOLE SERIAL INPUT	□ 10	31	□ + 5 VOLTS
CONSOLE SERIAL OUTPUT	□ 11	30	□ ALE
INT0 / DMA REQUEST	□ 12	29	□ PSEN
INT1	□ 13	28	□ A15
T0	□ 14	27	□ A14
T1	□ 15	26	□ A13
WR	□ 16	25	□ A12
RD	□ 17	24	□ A11
XTAL2	□ 18	23	□ A10
XTAL1	□ 19	22	□ A9
VSS	□ 20	21	□ A8

20 La broche désignée VSS sert à la connexion du circuit intégré à la masse (pôle négatif) de la tension d'alimentation de l'ensemble du système.

40 La broche désignée VCC sert à la connexion du circuit intégré au pôle positif de la tension d'alimentation. La tension nominale est de 5 V, avec une tolérance de 10%.

39-32 Les broches AD0 à AD7 véhiculent le bus multiplexé d'adresses et de données. Pour permettre le fonctionnement en programmeur d'EPROM ou d'EEPROM, il est nécessaire d'installer des résistances de rappel entre les broches du bus multiplexé et le pôle positif de l'alimentation.

28-21 L'octet haut du bus d'adresses est disponible sur les lignes **A8 à A15**. Les signaux du bus ne sont effectivement présents que quand la mémoire extérieure est utilisée.

1 Le **PORT 1** est partagé entre plusieurs fonctions spéciales.

La broche **PORT1.0** est utilisée pour commander le compteur 2. Le niveau de la broche correspond au signal interne **T2**.

2 La broche **PORT1.1** correspond au signal interne **T2EX**, entrée extérieure du compteur 2.

3 La broche **PORT1.2** est la sortie de la modulation de largeur d'impulsion PWM. Elle est disponible pour tout autre usage si la modulation de largeur d'impulsion n'est pas utilisée.

4 La broche **PORT1.3** véhicule le signal **ALE DISABLE** (*Address Latch Enable Disable*). Ce signal au nom contradictoire invalide le signal de verrouillage des adresses multiplexées (**ALE**) pendant la programmation d'une **EEPROM** ou d'une **EPROM**. Il est appliqué, avec le signal **ALE**, à l'entrée d'une porte ET qui commande l'entrée du verrou d'adresses.

5 L'impulsion de programmation **PROGRAMMING PULSE** est disponible sur la broche **PORT1.4**.

6 Elle est autorisée par **PROGRAM ENABLE** sur la broche **PORT1.5**.

7 La broche **PORT1.6** indique que l'accès direct à la mémoire est possible (**DMA ACKNOWLEDGE**).

Nota : Les broches (**PORT1.0 à PORT1.6**) peuvent éventuellement être utilisées pour d'autres tâches.

8 La broche **PORT1.7** peut être pour piloter une imprimante sérielle par des commandes spéciales du **BASIC**.

9 Le processeur est remis à zéro si une tension égale ou supérieure à **2,5 V** est appliquée pendant deux cycles d'horloge à la broche **RESET**.

30 Le signal **ALE** (*Address Latch Enable*) commande la mémorisation de l'octet d'adresses du bus multiplexé d'adresses-données.

29 Le signal **PSEN** (*Proram Strobe Enable*) commande la lecture du code dans la mémoire de programme.

19-18 Les broches **XTAL1** et **XTAL2** sont les connexions du quartz de l'oscillateur.

17-16 La mémoire extérieure est pilotées par le 8052 au moyen des broches **RD** (lecture) et **WR** (écriture).

15-14 Les broches **T1** et **T0** sont les entrées des compteurs 0 et 1.

13 L'entrée d'interruption externe **INT1** peut être utilisée par le **BASIC**. L'entrée combinée **INT0/DMA REQUEST** (voir page 110) est utilisée pour la programmation d'**EEPROM** et par la procédure de **DMA** (*Direct Memory Access*) artificiel.

10-11 Le terminal est raccordé par les interfaces adéquates aux broches d'entrée et sortie sérielles **CONSOLE SERIAL INPUT** (R x D) et **CONSOLE SERIAL OUTPUT** (T x D).

31 La broche 31 doit être reliée en permanence au pôle positif de l'alimentation. Si elle est reliée à la masse, la mémoire morte interne qui contient l'interpréteur **BASIC** est désactivée et le 8052AH devient un 8032 ordinaire.

2. Structures et utilisation des ports

Les microcontrôleurs 8052AH-BASIC possède quatre ports, de PO à P3, qui sont tous bidirectionnels au sens d'INTEL, c'est à dire quasi-bidirectionnels. Chacun est constitué d'un registre en mémoire (les registres spéciaux PO à P3), d'un tampons d'entrée et d'un tampon de sortie.

Dans le 8052AH-BASIC, les tampons de sortie des ports 0 et 2, ainsi que le tampon d'entrée du port 0, sont utilisés pour établir la communication entre le processeur et la mémoire extérieure. Dans ces cas, l'octet inférieur de l'adresse de la mémoire extérieure est multiplexé dans le temps avec l'octet de donnée à lire ou à écrire. Le port 2 se charge des huit bits les plus significatifs de l'adresse. Dans le cas où l'adresse est exprimée par un nombre de huit bits seulement, le port reproduit l'état du registre spécial correspondant. Il vaut mieux ne pas faire usage de cette faculté car elle limite les possibilités logiciels : il est impossible alors de faire des sauts absolus, qui sont toujours codés par seize bits sur le bus d'adresse.

Les broches du port 3 et deux broches du port 1 ont plusieurs fonctions. En plus de leur fonction normale d'entrée-sortie, elles remplissent les fonctions indiquées par le tableau 1.3.

P1.0	T2 (entré extérieure compteur 2)
P1.1	T2EX(rechargement/capture compteur 2)
P3.0	RxD (entrée série)
P3.1	TxD (Sortie série)
P3.2	INT0 (interruption extérieure)
P3.3	INT1 (interruption compteur 0)
P3.4	T0 (entrée extérieure compteur 0)
P3.5	T1 (entrée extérieure compteur 1)
P3.6	WR (impulsion d'écriture en mémoire extérieure)
P3.7	RD (impulsion de lecture en mémoire extérieure)

Tableau 1 : .

Les broches des ports peuvent être utilisées en entrées si elles ont fait l'objet préalablement d'une opération d'écriture à 1. Leur structure matérielle est particulière et telle que la fonction d'entrée ne peut être utilisée que si la sortie a été mise à 1.

3. Configuration matérielles des entrées et sorties

Les ports ont une structure dite quasi-bidirectionnelle. Chaque broche peut être utilisée comme entrée ou comme sortie, sans définition préalable du sens des données contrairement à de nombreux autres microcontrôleurs ou périphériques. La figure 1.9 montre la structure matérielle de chaque broche. Chaque broche est représentée en mémoire par une bascule D. La donnée y est écrite par une impulsion d'écriture interne du processeur. Le niveau de sortie de la bascule (Q) est placé sur le bus interne dès que survient une impulsion de lecture de la broche. Certaines instructions utilisent la lecture de la bascule, certaines autres utilisent la lecture de la broche.

Comme le montre la figure 2, les tampons de sortie des ports 0 et 2 sont commutables par un signal de commande interne entre un bus d'adresses interne et le bus extérieur d'adresses/données. Pendant une opération sur la mémoire extérieure, le niveau des bascules du registre spécial correspondant au port 2 reste inchangé. Celui des bascules du port 0 est passé à 1.

Le schéma montre aussi que le niveau de sortie des broches du port 3 est déterminé par le signal *alternate output function* quand la bascule correspondante est mise à 1. La valeur réelle de P3.x est présente en permanence sur *alternate input function*. Les ports 1,2 et 3 sont munis de résistances internes de rappel au niveau haut (*pull up*). Chaque broche peut être commutée indépendamment en entrée ou en sortie, sauf celles des ports 0 et 2 quand la mémoire extérieure est utilisée. Si une broche est utilisée en entrée, sa bascule doit contenir un 1 pour que le FET (transistor à effet de champ) de sortie soit bloqué. La broche est alors forcées au niveau haut par la résistance interne mais elle peut ramenée au niveau bas par le circuit extérieur.

Le port 0 est légèrement différent, en ce qu'il ne comporte pas de résistance de rappel. Le FET qui en tient lieu est utilisé pour produire un 1 logique pendant les accès à la mémoire interne. Comme les deux FET sont effectivement pilotés quand le port 0 est utilisé comme bus d'adresse/données, nous avons affaire à de vrais niveaux logiques, actifs. Dans tous les autres cas, les FET «supérieurs» se comportent donc comme des sorties à drain ouvert. Lorsqu'un 1 y est écrit, le FET «inférieur» est bloqué et la sortie est flottante, non connectée, comme celle des circuits dits à trois-états. La résistance de rappel des ports 1, 2 et 3 fait qu'on les appelle quasi-bidirectionnels. Lors de la remise à zéro, tous les ports sont placés à 1. Si un zéro est écrit dans un des ports, il faudra qu'il soit remis à 1 avant qu'il puisse être utilisé en entrée.

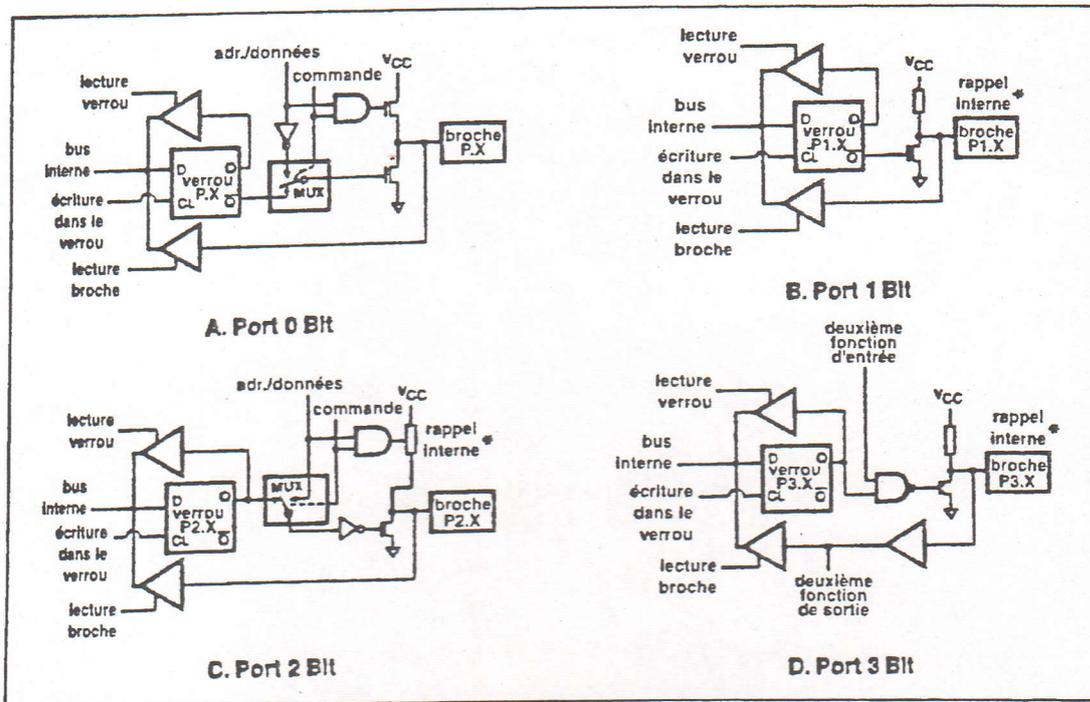


Figure 2 : L'organisation matérielle des broches des ports d'entrée et sortie

Les tampons de sortie des ports 1, 2 et 3 peuvent piloter chacun quatre entrées TTL. Les entrées des versions HMOS de la famille MCS-51 peuvent être pilotées par des sorties TTL. Les versions HMOS et CMOS peuvent être pilotées par des sorties à collecteur ouvert ou à drain ouvert. Il faut toutefois tenir compte du fait que dans ce cas la transition de zéro à un n'est pas rapide. Cette lenteur est inhérente à la conception des ports.

Les tampons du port 0 peuvent piloter chacun huit entrées TTL. Pour le pilotage d'entrée HMOS, à moins qu'il ne s'agisse du bus d'adresses/données, des résistances de rappel sont nécessaires.

4. Instructions et commandes du BASIC-52

□ RUN

Syntaxe : RUN<cr>

Type : commande

Mode : commande

Aussitôt après la réception de la commande RUN, le microcontrôleur remet à zéro toutes les variables et commence l'exécution du programme à partir de la première ligne. Les commandes RUN et GOTO sont les seuls qui permettent à l'utilisateur de lancer l'exécution d'un programme.

L'interpréteur passe alors du mode commande au mode exécution. Le programme en cours d'exécution peut être interrompu par le caractère *Control-C*.

□ CONT

Syntaxe : **CONT**<cr>

Type : commande

Mode : commande

Un programme interrompu par la commande *Control-C* ou l'instruction **STOP** peut être relancé par la commande **CONT** (continue)

□ LIST

Syntaxe : **LIST**<cr>

Type : commande

Mode : commande

Après **LIST**<cr> le programme est 'vidé' (le mot anglais '*dump*' signifie décharge comme dans décharge municipale) à l'écran du terminal. Cette commande produit un affichage lisible du programme, notamment en rajoutant des espaces après le numéro de ligne et après chaque instruction. Ces espaces n'existent pas dans le programme, mais seulement à l'affichage. L'opération de 'listing', très pratique pour ne pas dire indispensable lors du débogage, peut être interrompue par le caractère *Control-C*.

□ LIST #<cr>

LIST # est une variante de **LIST**.

Dans ce cas, le listing est envoyé directement à une imprimante sérielle par un port supplémentaire. Le deuxième port sériel utilise comme ligne de sortie matérielle la broche P 1.7; son débit doit être fixé par la commande **BAUD**.

□ LIST@<cr> *seulement pour la version 1.1*

Cette commande a en principe les mêmes effets que la commande **LIST**; la différence est qu'elles fait appel à un pilote de sortie écrit par l'utilisateur. Le pilote sortie doit être en sous-programme en langage machine installé à l'adresse 403 CH dans la mémoire vive extérieur.

□ NEW

Syntaxe : **NEW**<cr>

Type : commande

Mode : commande

Après avoir reçu la commande **NEW**, le BASIC-52 efface le programme de la mémoire vive. Toutes les variables sont remises à zéro. Les chaînes de caractère et les interruptions sont également supprimées. L'horloge temps réel, l'espace de traitement des chaînes et la valeur du pointeur de pile interne (adresse 3EH) ne sont pas altérés. Globalement, l'instruction **NEW** efface la mémoire et toutes les variables.

□ RAM & ROM

Syntaxe : **RAM**<cr> **&ROM**<cr>

Type : commande de fichier en EPROM

Mode : commande

Cette commande permet de choisir entre les programmes stockés en EPROM et ceux qui sont présents en RAM. Le programme sélectionné peut être imprimé par **LIST** ou démarré par **RUN**. L'adresse de départ du programme en RAM est 512 (200_H), celle du programme en (E)PROM est 32784 (8010_H). Après **RAM**<cr> le BASIC-52 traite le programme en RAM. C'est la situation la plus courante. Habituellement la machine revient à ce mode après remise à zéro. La commande **ROM**[entier]<cr> sélectionne un programme en (E)PROM. A défaut d'un nombre entier après **ROM**, le premier programme est sélectionné.

Si le nombre saisi pointe sur un programme qui n'existent pas dans l'(E)PROM, par exemple ROM6<cr> alors que l'(E)PROM ne contient que quatre programmes, le BASIC-52 renvoie le message: **ERROR: PROM MODE.**

Si le choix se porte sur un programme en (E)PROM, il n'est pas copié dans la RAM et ne peut donc pas être modifié. Si des modifications doivent être apportées, il convient de copier le programme en RAM par l'instruction **XFER<cr>**. Comme le programme n'est pas copié automatiquement en RAM, plusieurs programmes peuvent coexister en RAM et en ROM. L'utilisateur peut même passer d'un programme à

l'autre. Les variables **MTOP** et **FREE** sont toujours relatives au programme en RAM, jamais au programme en (E)PROM.

□ **XFER**

Syntaxe : **XFER<cr>**

Type : commande de fichier en (E)PROM

Mode : commande

La commande **XFER<cr>** copie dans la RAM le programme sélectionné en (E)PROM; la machine passe automatiquement du mode RAM au mode ROM. Si la commande **XFER** est émise alors que le micro contrôleur travaille déjà en mode RAM, le programme est copié de la RAM à la ROM et le mode RAM est sélectionné. Il ne se passe rien de particulier, sinon que le processeur passe quelques millisecondes à exécuter la copie. Le programme chargé en RAM peut être modifié.

□ **PROG**

Syntaxe : **PROG<cr>**

Type : commande de fichier en (E)PROM

Mode : commande

Cette commande permet de copier en EPROM le programme actif à un moment donné. Le programme à copier peut se trouver soit en EPROM soit en RAM. Cette commande ne fonctionne que si le matériel le permet: la platine doit comporter les composants ad hoc et la tension de programme correcte doit être présente. Après réception de la commande **PROG<cr>**, le BASIC-52 affiche sur le terminal le numéro d'ordre du programme en EPROM.

□ **PROG1 & PROG2**

Syntaxe : **PROG1<cr> &PROG2 <cr>**

Type : commande de fichier en (E)PROM

Mode : commande

Normalement le microcontrôleur attend après la mise sous tension un caractère <espace> en provenance du terminal. Ce caractère reçu, il calcule le débit de la liaison sérielle, s'y adapte et envoie le message de bienvenue. La commande **PROG1** permet de simplifier le processus: elle stocke la vitesse en EPROM. Après une remise à zéro (**RESET**) ou une mise sous tension, le microcontrôleur utilise l'information de débit stockée en EPROM pour émettre immédiatement le message de bienvenue. Si la vitesse doit être modifiée, il convient d'utiliser une EPROM neuve ou effacée.

La commande **PROG2<cr>** a la même effet que **PROG1<cr>** pour le débit mais, au lieu d'émettre le message de bienvenue, le microcontrôleur lance le premier programme de l'EPROM. Cette possibilité est importante car elle permet de lancer un programme dès la mise sous tension, sans terminal. Ce sera la mode de fonctionnement des automates autonomes. La commande **PROG2<cr>** est équivalent à la frappe de **ROM1<cr>** puis de **RUN<cr>** dans le cas où l'EPROM aurait été programmée par **PROG1<cr>**.

□ **FPROG, PROG1 & PROG2**

Syntaxe : **PROG<cr>, PROG1<cr> &PROG2<cr>**

Type : commande de fichier en (E)PROM

Mode : commande

Ces trois commandes sont équivalentes à **PROG<cr> PROG1<cr> et PROG2<cr>**, à cette différence près qu'elles font appel à un algorithme de programmation mis au point par INTEL et dénommé en toute modestie INTELLigent. L'utilisateur doit faire en sorte d'alimenter l'EPROM sous une tension de 6 V au lieu des 5 V standard. Pour ce faire, il ya lieu d'interrompre la ligne d'alimentation de l'EPROM et de relier le composant, par exemple par l'intermédiaire d'un petit relais, à une source de tension de 6 V. Pratiquement il est possible d'enficher dans le support destiné à l'EPROM un autre support dont la broche 28 sera repliée vers l'extérieur pour recevoir la tension d'alimenter de 6 V.

□ **FPROG3, PROG4, PROG3 & PROG4**

Syntaxe : **PROG3<cr> PROG4<cr> &PROG3<cr> &PROG<cr>**

Type : commande de fichier en (E)PROM

Mode : commande

La commande **PROG3** est très similaire à **PROG1**, avec quelques raffinements supplémentaires. Elle permet de stocker la valeur de la variable système **MTOP**. Lors d'un redémarrage (**RESET**), le micro contrôleur ne remet pas à zéro la totalité de la mémoire, mais seulement à partir de **MTOP**. Si le système est équipé d'une source de tension de sauvegarde, les données stockées en-dessous de **MTOP** ne seront pas perdues. L'utilisateur peut prévoir, en donnant la valeur convenable à **MTOP**, la quantité de RAM qui ne sera pas effacée. La commande **PROG4** est similaire à **PROG3** mais, comme **PROG2** elle lance l'exécution d'un programme en (E)EPROM. Les variantes **FPROG3** et **FPROG4** sont équivalentes à **PROG3** et **PROG4**; elles font usage de l'algorithme de programmation INTELLigent. L'utilisateur doit veiller à ce que la tension d'alimentation de l'EPROM soit de 6 V pendant la programmation.

□ **PROG5, PROG6, PROG5 & PROG6**

Syntaxe : **PROG5<cr> PROG6<cr> &PROG5<cr> & PROG6<cr>**

Type : commande de fichier en (E)PROM

Mode : commande

La variante **PROG5**, est une extension de **PROG3**. Dans ce cas aussi le débit sériel et **MTOP** sont stockés dans l'EPROM, mais une troisième option se présente lors de la remise à zéro (**RESET**): si l'emplacement mémoire d'adresse $5F_H$ (95 en décimal) dans la mémoire extérieure pour le stockage de données. En principe, le microcontrôleur passe en mode commande après la remise à zéro (**RESET**). Il est possible, en stockant la valeur 34_H (52 en décimal) à l'adresse $5E_H$ (94 en décimal) de la mémoire extérieure, de mettre le processeur en mode RUN TRAP. Les possibilités qui en résultent sont décrites plus loin.

La variante **PROG6** est à peu près identique à **PROG5**. La seule différence est que le microcontrôleur fait, à la remise à zéro, un appel de sous-programme (**CALL**) à l'adresse 4039_H de la mémoire de programme extérieure. Il appartient à l'utilisateur d'y inscrire son propre programme de remise à zéro en langage machine et d'écrire la valeur $0A5_H$ à l'adresse $5F_H$ de la mémoire extérieure. Comme pour les précédentes, les variantes **FPROG5** et **FPROG6** sont équivalentes à **PROG5** et **PROG6**, avec l'algorithme de programmation INTELLigent.

□ **BAUD**

Syntaxe : **BAUD<cr>**

Type : directive

Mode : commande ou exécution

Cette commande permet de fixer le débit du demi-port sériel de sortie vers une imprimante (P1.7). Cette directive n'a l'effet prévu que si la variable **XTAL** contient la valeur correcte. Si aucune valeur n'a été écrite dans **XTAL**, le processeur prend par défaut la fréquence standard de 11,0592 MHz. Si le quartz utilisé a une autre fréquence, par Exemple 9 MHz, la variable doit être modifier par **XTAL=900000**. Ce canal sériel supplémentaire permet l'impression du programme. L'impression est lancée par les commandes **PRINT#** et **LIST#**. Un débit de 4800 bauds convient en général. Le format est fixe: un bit de départ, huit bits de données, deux bit d'arrêt, pas de bit de parité.

□ CALL

Syntaxe : **CALL**[entier]<cr>

Type : instruction de séquence

Mode : commande et exécution

L'instruction **CALL** provoque un appel à sous-programme. Le nombre entier qui suit l'instruction est l'adresse en mémoire de programme du début du sous-programme. Le retour au BASIC est provoqué par l'instruction **RET** à la fin du sous-programme. Si le nombre qui suit l'instruction **CALL** est compris entre 0 et 127 (7F_H), la version 1.1 interprète cette valeur comme décalage pour trouver le vecteur de l'adresse de début. La valeur est doublée puis ajoutée à 4100H. Ainsi **CALL0** pointe sur l'adresse 4100_H, **CALL1** pointe sur l'adresse 4102_H.

□ CLEAR, CLEARI & CLEARS

Syntaxe : **CLEAR**<cr>, **CLEARI**<cr> & **CLEARS**<cr>

Type : instruction de séquence

Mode : commande et exécution

L'instruction **CLEAR** met à zéro toutes les variables arrête toutes les interruptions utilisées par le BASIC-52. Les instructions **ONEX1** et **ONTIME** sont inactivées aussi. Elle peuvent être redémarrées par la suite. La détection des erreurs par **ONERR** est désactivée aussi. L'instruction **CLEAR** n'affecte pas le fonctionnement de l'horloge en temps réel lancé par l'instruction **CLOCK1**. L'espace réservé en mémoire pour les chaînes par l'instruction **STRING**[expr] n'est pas affectée, il ne doit donc pas être réservé à nouveau. A ces exceptions près, l'instruction **CLEAR** met à zéro toutes les variables. L'instruction **CLEAR** (*clear interrupt*) inhibe seulement les interruptions. Cela revient en pratique à manipuler les bits 2 et 3 du registre spécial IE, et à remettre à zéro le bit d'état (statut bit) Cette instruction permet d'inhiber les interruptions dans des parties déterminées du programme BASIC. Elles peuvent être validées par la suite par les instructions **ONTIME** et **ONEX1**. L'horloge en temps réel n'est pas affectée par cette instruction. L'instruction **CLEARS** remet à zéro toutes les piles du BASIC-52 les pointeurs de pile de séquence (*controlstack*) et de pile d'argument sont remises à leur valeur par défaut, les piles sont vides. Le registre spécial du pointeur de pile matérielle est chargé avec l'adresse 62 (3E_H) de la RAM interne. Il est possible de sortir ainsi des boucles **FOR-NEXT**, **DO-WHILE** et **DO-UNTIL**.

□ CLOCK0 & CLOCK1

Syntaxe : **CLOCK0**<cr>, **CLEARI**<cr> & **CLOCK1**<cr>

Type : instruction de séquence

Mode : commande et/ ou exécution

L'instruction **CLOCK1** lance l'horloge en temps réel qui est présente en performance dans le BASIC-52 L'opération consiste à mettre à 1 les bits 2 et 7 du registre IE. Le registre **TIME** est augmentée de 1 toutes les 5 ms (millisecondes). Cette instruction utilise le compteur 0 (**TIMER/COUNTER0**) dans son mode à 13 bits , ce qui produit une interruption toutes les 5 ms. Le BASIC-52 calcule lui-même la valeur avec laquelle le compteur 0 doit être rechargé. Pour cette application aussi, il est de la première importance que la valeur de **XTAL** soit fixée correctement; la valeur standard est 11,0592 MHz. L'instruction **TIME** compte de 0 à 65535,995 s. Cette valeur atteinte, le compteur repasse à zéro. Comme l'horloge utilise des interruptions produites par le compteur 0, l'utilisateur ne doit pas accéder aux registres correspondants quand l'horloge est en service. Les interruptions provoquées par le fonctionnement de l'horloge ralentissent le BASIC, qui ne peut plus «tourner» qu'à 99,6 % de sa vitesse de traitement maximale. Cela signifie que l'horloge accapare 0,4% du temps de fonctionnement de la machine. En pratique, c'est parfaitement négligeable. L'instruction **CLOCK0** peut être utilisée pour arrêter l'horloge. Elle remet à zéro le bit 2 du registre IE et redonne à l'utilisateur la possibilité d'utiliser pleinement le compteur 0 et les interruptions qu'il produit. Cette instruction est la seule à pouvoir arrêter l'horloge; **CLEAR** et **CLEAR1** n'ont aucun effet.

□ DATA - READ - RESTORE

Syntaxe : **DATA**[expr], **READ**[expr], **RESTORE**

Type : déclaration

Mode : exécution

L'instruction **DATA** permet de définir sur une ligne des valeurs qui seront lues par l'instruction **READ**. Plusieurs valeurs sur une ligne seront séparées par des virgules. L'instruction **READ** lit une expression dans une ligne de données. Elle est toujours suivie d'une ou plusieurs variables. S'il y a plus d'une variable, elles doivent être séparées par des virgules. L'instruction **RESTORE** remet à zéro le pointeur qui vise le bloc de données à lire.

□ DIM

Syntaxe : **DIM**[expr]<cr>

Type : déclaration

Mode : commande et exécution

L'instruction **DIM** réserve un emplacement pour des matrices, en l'occurrence des tableaux puis- que les matrices du BASIC-52 n'ont qu'une dimension, laquelle ne peut pas dépasser 254 éléments.

La définition d'un tableau ne peut être faite qu'une fois dans un programme. Une tentative de redéfinition produit le message **ARRAY SIZE ERROR**. Si un programme utilise un tableau qui n'a pas été défini, le BASIC-52 lui affecte par défaut la taille 10. Tous les tableaux sont remis à zéro par les commandes **RUN**, **NEW** et **CLEAR**. Le nombre d'octets réservés en mémoire est de $6 * (\text{taille du tableau} + 1)$. L'instruction **DIMA(100)** occuperait 606 octets. En général la taille des tableaux est limitée par la taille de la mémoire disponible.

□ DO - UNTIL

Syntaxe : **DO - UNTIL**[expr]

Type : instruction de séquence

Mode : exécution

L'instruction de boucle **DO-UNTIL**[rel expr] permet au programme BASIC d'entrer dans une boucle contrôlée. Toutes les instructions comprises entre **DO** (fais) et **UNTIL** (jusqu'à ce que) sont exécutées aussi longtemps que l'expression qui suit **UNTIL** n'est vraie. Les boucles **DO-UNTIL** peuvent être imbriquées.

□ DO - WHILE

Syntaxe : **DO - WHILE**

Type : instruction de séquence

Mode : exécution

La boucle **DO-WHILE**[expr] est similaire à la boucle **DO-UNTIL**. Toutes les instructions comprises entre **DO** et **WHILE** sont exécutées aussi longtemps que l'expression qui suit **WHILE** est vraie. Les boucles **DO-UNTIL** et **DO-WHILE** peuvent être imbriquées.

□ END

Syntaxe : **END**

Type : instruction de séquence

Mode : exécution

Le programme s'arrête dès qu'il trouve l'instruction **END**. L'instruction **CONT** ne peut pas relancer un programme arrêté par **END**. Si le programme n'est pas terminé par **END**, l'interpréteur s'arrête après la dernière instruction du programme.

□ **FOR - TO {STEP} - NEXT**

Syntaxe : **FOR - TO {STEP} - NEXT**

Type : instruction de séquence

Mode : dans la version 1.0, commande; dans la version 1.1; commande et exécution

Exécution en boucle d'une série d'instruction, avec incrémentation d'un compteur à chaque passage dans la boucle. L'état de départ du compteur est donné après **FOR** la condition de sortie, ou état d'arrivée du compteur par **TO**, la raison de l'incrémentation après **STEP**. La valeur du pas (**STEP**) peut aussi être négative. Dans ce cas, la valeur de départ doit être supérieur à la condition de sortie. Si la valeur du pas n'est pas indiquée, elle set de 1 par défaut. La variable qui suit **NEXT** dans le programme peut être omise, mais pas l'instruction **NEXT**, comme dans certains BASIC.

□ **GOSUB-RETURN**

Syntaxe : **GOSUB[num ln] - RETURN**

Type : instruction de séquence

Mode : exécution

L'instruction **GOSUB** dérouté provisoirement l'interrupteur du programme principal. Le processeur saute à l'exécution d'un sous-programme, à la ligne indiquée par [num ln]. L'adresse de l'instruction qui suit le numéro de ligne [num ln] est stockée sur la pile, de façon à permettre la reprise du programme. La fin du sous-programme principal est marquée par l'ordre de retour à la boucle principale **RETURN**. La boucle principal peut être elle-même un sous-programme, c'est-à-dire qu'il est possible d'imbriquer des sous-programmes.

□ **GOTO**

Syntaxe : **GOTO[num ln]**

Type : instruction de séquence

Mode : commande et exécution

L'instruction **GOTO** ordonne à l'interpréteur de sauter un certain nombre de lignes du programme pour continuer l'exécution au numéro de ligne indiqué par [num ln]. Dans le mode commandes, **GOTO** permet de lancer l'exécution à partir d'une ligne donnée, au lieu de le faire du début du programme, comme par la commande **RUN**. Une différence supplémentaire entre **GOTO** et **RUN** est que les variables ne sont pas remises à zéro. Il est possible ainsi de démarrer au début du programme sans remettre les variables à zéro. Cependant il faut tenir compte du fait que si le programme a été modifié avant le lancement de la commande **GOTO**, il n'est pas exclu que les modifications affectent l'espace de la mémoire utilisé par les variables.

□ **ON GOTO & ON GOSUB**

Syntaxe : **ON[expr] GOTO[num ln],[num ln],[num ln],...[num ln]**

ON[expr] GOSUB[num ln],[num ln],[num ln],...[num ln]

Type : instruction de saut conditionnel

Mode : exécution

L'interpréteur exécute un saut à un numéro de ligne donné en fonction de la valeur de l'expression qui suit l'instruction **ON**.

□ **IF - THEN - ELSE**

Syntaxe : **IF[expr rel] THEN instruction valide ELSE instruction valide**

Type : instruction conditionnel

Mode : exécution

L'instruction **IF** (si conditionnel, en anglais) indique la condition d'exécution de l'instruction qui suit **THEN** (alors). Si le test ne satisfait pas la condition stipulée, l'exécution se poursuivra par l'instruction qui suit **ELSE** (autre).



□ INPUT

Syntaxe : **INPUT**

Type : entrées /sorties

Mode : exécution

L'instruction **INPUT** demande des variables pendant le déroulement du programme pour les traiter dans le programme. Lors de la demande de variables, le terminal affiche un point d'interrogation (?). Si l'utilisateur frappe moins de données que le programme n'en attend, l'interpréteur demande gentiment **TRY AGAIN** (essaie encore). La chaîne de caractères frappée (éventuellement) s'affiche à l'écran avant le point d'interrogation. Si une virgule prend la place de la première variable, le point d'interrogation n'est pas affiché.

□ LET

Syntaxe : **LET**[var]=[expr]

Type : déclaration

Mode : exécution

L'instruction **LET** peut être utilisée pour assigner une valeur à une variable. Elle est optionnelle dans tous les cas. C'est une survivance des premiers BASIC.

□ ONERROR

Syntaxe : **ONERROR**[num ln]

Type : instruction de séquences

Mode : exécution

Cette instruction permet de définir le comportement du processeur dans le cas où l'interpréteur trouve une erreur dans le programme. Si l'instruction **ONERROR** figure dans un programme, toute erreur pendant le déroulement du programme provoquera l'exécution de la partie qui suit l'instruction. La mémoire extérieure contient à l'adresse 257 (101_H) un code (**ERROR CODE**) qui indique la nature de l'erreur. Le programme peut lire ce code par l'instruction **CODERR=XBY (257)**. Les quatre valeurs possibles sont:

Code erreur	Cause
ERROR CODE = 10	division par zéro
ERROR CODE = 20	dépassement
ERROR CODE = 30	dépassement négatif
ERROR CODE = 40	mauvais argument

□ ONEX1

Syntaxe : **ONEX1**[num ln]

Type : instruction de séquence

Mode : exécution

Cette instruction permet à l'utilisateur d'exploiter les interruptions extérieures. L'instruction **ONEX1** indique à quelle ligne le programme doit sauter en réaction à une interruption provoquée par la broche 1 du 8052. Le sous-programme BASIC visé par l'instruction **ONEX1** doit se terminer par l'instruction **RETI** (retour d'interruption). Si l'instruction **RETI** fait défaut, le programme continue de s'exécuter, mais le drapeau d'interruption reste levé, et les interruptions ultérieures seront inactives, tant qu'une instruction **RETI** n'aura pas été exécutée. L'instruction **ONEX1** met à 1 les bits 3 et 7 du registre IE (*Interrupt Enable*). L'instruction **ONTIME** est à un niveau de priorité supérieur à celui de **ONEX1**, elle peut donc interrompre l'exécution du sous-programme appelé par **ONEX1**. L'interruption extérieures service par **ONEX1** est inhibée pendant l'émission d'une chaîne de caractère par le port sériel. Si cela peut présenter un inconvénient et que des chaînes longues sont prévues, il vaut mieux fractionner les textes à émettre en plusieurs chaînes de caractère plus courtes. Ce fractionnement se réalise tout simplement par une suite de lignes **PRINT**.

□ ONTIME

Syntaxe : **ONTIME**[expr], [num ln]

Type : instruction de séquence

Mode : exécution

Le temps d'exécution des instructions du BASIC se compte millisecondes. Cela peut poser des problèmes si on veut utiliser au mieux les capacités des compteurs, qui comptent en micro-secondes. L'instruction **ONTIME** résout ce problème en grande partie; elle est suivie d'un paramètre numérique qui sera comparé en performance à la variable réservée **TIME**. Dès que la variable **TIME** est supérieure à l'argument de **ONTIME** une interruption se produit. Cette interruption amène l'interpréteur, par une instruction **GOSUB**, à la première ligne du sous-programme à exécuter, indiquée comme deuxième argument de l'instruction. Le fonctionnement de l'horloge est lancé par l'instruction **CLOCK1**.

□ PRINT, P. (ou ? dans la version 1.1)

Syntaxe : **PRINT**[expr], **P**[expr], ou **?**[expr]

Type : instruction d'entrée /sortie

Mode : commande et exécution.

Cette commande permet d'afficher des variables et des chaînes de caractère à l'écran du terminal. Le format de l'affichage peut être modifié par des options. La version 1.1 accepte, en plus des formes **PRINT** et **P.**, l'instruction sous la forme abrégée du point d'interrogation (?). En plus de la commande **PRINT** ordinaire, qui envoie les caractères vers le terminal, il existe une commande spécial, sous les formes **PRINT##**, **P.#** en ? #; cette variante dirige la sortie des caractères par le port sériel auxiliaire, la broche P 1.7.

□ PHO., PH1., PHO.# & PH1.#

Syntaxe: **PHO**[expr], **PH1**.[expr], **PHO.#** [expr] & **PH1.#** [expr]

Type : instruction d'entrée /sortie

Mode : commande et exécution.

Les instructions **PHO.** et **PH1.** ont en principe les mêmes effets que **PRINT**, à cette différence près que les données sont affichées en hexadécimal. **PH0.** supprime les deux premiers chiffres (non significatifs) s'il s'agit d'un nombre inférieur ou égal à 225 (**OFF_H**) **PH1.** imprime toujours quatre chiffres. Les variables sont toujours entières; les nombres en virgule flottante ne peuvent pas être affichées en hexadécimal. Si la variable n'est pas entière et comprise dans l'intervalle de 0 à 65535 (**OFFF_H**) elle sera affichée u format habituel, sans le H qui suit les nombres hexadécimaux. Ces commandes (**PRINT**, **PHO.** et **PH1.**) peuvent être utilisées pour convertir des nombres décimaux en nombres hexadécimaux, et inversement. Les variantes **PHO.#** et **PH1.#** sont autorisées, elles commandent la sortie par le port sériel auxiliaire (P 1.7)

□ PUSH

Syntaxe : **PUSH**[expr]

Type : déclaration

Mode : commande et exécution.

L'expression qui suit l'instruction **PUSH** est évaluée et le résultat est placé sur la pile d'arguments. Cette instruction, associée à l'instruction **POP**, permet l'échange de variable entre le BASIC et un programme en langage machine, par le biais de la pile, la dernière variable poussée sur la pile en sera retirée la première.

□ **POP**Syntaxe : **POP**[var]

Type : déclaration

Mode : commande et exécution.

La dernière valeur empilée peut être affectée à la variable indiquée après l'instruction **POP**. Les nombres ont été placés sur la pile par l'instruction **PUSH** ou par un sous-programme en langage machine. Si l'instruction **POP** est utilisée alors que la pile d'arguments est vide, l'interpréteur renvoie le message d'erreur **A-STACK ERROR**.

□ **PWM**Syntaxe : **PWM**[expr], [expr], [expr]

Type : instruction d'entrée /sortie

Mode : commande et exécution.

L'instruction **PWM** (*Pulse Width Modulation*, ou Modulation de Largeur d'Impulsion) produit sur la broche **P1.2** des trains d'impulsion de durée et de forme variables. Les trois expressions qui suivent l'instruction indiquent, dans l'ordre: la durée de l'état 'haut', la durée de l'état 'bas', le nombre de périodes à produire. L'unité des deux premiers arguments est la période de l'horloge interne du microcontrôleur, soit douze fois la période de l'oscillateur à quartz. Pour le quartz standard à 11,0592 MHz, la période est de 1,085 s. Toutes les expressions doivent être des entiers compris entre 0 et 65535 inclus (0 expr 65535 (OFFFH)). La valeur minimale des deux premiers arguments est 25.

□ **REM**Syntaxe : **REM**

Type : instruction (sans effet)

Mode : exécution. dans la version 1.0, commande et exécution dans la version 1.1.

REM (abréviation de remarque) donne au programmeur la possibilité d'inclure des commentaires dans son programmes sans influencer sur son fonctionnement. L'interpréteur ignore la partie de la ligne qui suit l'instruction **REM**. Il n'est pas possible d'inclure une instruction **BASIC** séparées des commentaires par un double point (:) dans une ligne de programme commencée par **REM**.

□ **RETI**Syntaxe : **RETI**

Type : instruction de séquences

Mode : exécution

C'est l'instruction **RETI** qui détermine la fin d'un sous programme d'interruption, en **BASIC-52** comme en langue machine. En **BASIC-52**, elle est nécessaire à la fin des sous-programmes appelés par les instructions **ONTIME** et **ONEX1**. Ses effets sont comparables à ceux de **RETURN**, en plus, les drapeaux d'interruption sont baissés. L'utilisation de **RETURN** au lieu de **RETI** ne bloque pas le programme, mais toutes les interruptions à venir seront ignorées.

□ **STOP**Syntaxe : **STOP**

Type : instruction de séquences

Mode : exécution

L'instruction **STOP** interrompt momentanément le déroulement du programme. Le programme peut être repris par **CONT**. Les valeurs des variables sont sauvegardées.

□ UI1&UI0

Syntaxe : **UI1&UI0**

Type : instruction de séquences

Mode : commande et exécution

L'instruction **UI** remplace, comme organe de saisie, la ligne sérielle par un sous-programme en langage machine écrit par l'utilisateur. Ce choix est matérialisé par le bit 30 (dans la mémoire interne à l'adresse 23.6H). Lorsque ce bit est à zéro, l'interpréteur utilise la routine interne standard.

Lorsque l'interpréteur a trouvé l'instruction **UI1** (le bit 30 à) et qu'une saisie du terminal en attendant, il saute (par une instruction **JUMP**), à l'adresse extérieure 4033H UN sous programme de saisie en langage machine doit s'y trouver. Le résultat de la saisie, un caractère ASCII, doit être placé dans l'accumulateur, avant qu'une instruction **RET** renvoie l'interpréteur au programme BASIC.

□ UO1&UO0 (User Output)

Syntaxe : **UO1&UO0**

Type : instruction de séquences

Mode : commande et exécution

L'instruction **UO** remplace, comme organe d'entrée, la ligne série par un sous-programme en langage machine écrit par l'utilisateur. Ce choix est matérialisé par le bit 28 (dans la mémoire interne à l'adresse 23.4H). Lorsque ce bit est à zéro, l'interpréteur utilise la routine de sortie interne standard.

□ IDLE

Syntaxe : **IDLE** (seulement pour la version 1.1)

Type : instruction de séquences

Mode : exécution

L'instruction **IDLE** met le système en «hibernation». Toutes les fonctions sont suspendues jusqu'à ce que se produise une interruption par **ONTIME** ou **ONEX1**. Si l'une de ces interruptions n'a pas été prévue, le système entre dans un sommeil éternel, en termes courants il est plant. Lorsque qu'une interruption se présente, le sous-programme d'interruption est exécuté d'abord, puis l'exécution continue par l'instruction qui suit **IDLE**.

Pendant la phase des sommeil. Ce signal indique qu'aucune activité n'aura lieu sur le bus extérieur et que l'accès direct à la mémoire (**DMA**) est possible. Il est possible de quitter le mode sommeil par une routine en langage machine qui remet à 1 le bit 33 (24.1 H dans la mémoire accessible par bit).

□ RROM (RUN ROM, version 1.1 seulement)

Syntaxe : **RROM**[entier]

Type : instruction de séquences

Mode : commande et exécution

L'instruction **RROM** permet de lancer directement un programme présent en (E)PROM. L'entier après l'instruction indique le programme à lancer. Par exemple **RROM 2** démarre le deuxième programme présent dans l' (E)PROM. Il s'agit d'un instruction qui peut être inscrite dans un programme; il est donc possible de démarrer un programme pendant l'exécution d'un autre.

Si l'utilisateur demande une chose impossible, par exemple **RROM 8** alors qu'il n'y a que six programmes présents ou qu'il n'y a pas de **ROM** dans le système, le programme continue simplement par l'instruction suivante, sans message d'erreur.

L'exécution de l'instruction **RROM** remet à zéro toutes les variables; il n'est donc pas possible d'utiliser les mêmes variables dans deux programmes. Accessoirement, **RROM** efface toutes les demandes interruptions du BASIC-52.

□ LD@ & ST@ (version 1.1 seulement)

Syntaxe: **LD @**[expr] & **ST @** [expr]

Type: instruction d'entrée /sortie

Mode: commande et exécution

L'instruction ST@ permet de stocker à un emplacement fixe une variable en virgule flottante.

L'expression qui suit l'instruction est un entier qui indique l'adresse à utiliser. La variable elle-même doit être présente sur la pile.

L'instruction ST @ doit être utilisée en combinaison avec LD@, qui replace les variables sur la pile.

Il ne faut pas oublier que les variables sont en virgule flottante et que chacune occupe 6 octet.

Ces deux instructions sont utiles pour le cas où l'utilisateur a prévu une mémoire non volatile ou une alimentation de sauvegarde.

□ PGM

Syntaxe: PGM

Type: instruction de séquence

Mode: commande et exécution

L'instruction PGM permet à l'utilisateur de stocker des données dans une EPROM ou une EEPROM pendant l'exécution d'un programme. Le circuit décrit dans le chapitre 7 ne permet que l'utilisateur d'EPROM de type 2764 et 27128. Avant l'appel de la fonction PGM, un certain nombre d'emplacements de la mémoire interne doivent contenir les informations nécessaires: 18 H (24D), 19 H (25D), 1BH(27D), 1 EH(30D) et 1FH (31D). Le BASIC utilise ces adresses qui font partie des zones normalement réservées à l'utilisateur.

Adresse	Contenu
1BH: 19 H	(27 D: 25D) Adresse de la source des données à copier dans l'EPROM, poids faible dans 19H, poids fort dans 1 BH
1 AH :18 H	(26D: 24D) Adresse (-1) de la destination des données à copier dans l'EPROM, poids faible dans 18 H, poids fort dans 1 AH (31D :30D) Nombre d'octets à copier, poids faible dans 1 EH, poids fort dans 1FH
1FH :1 ^E H	

L'utilisateur doit aussi spécifier la durée des impulsions de programmation de l'EPROM, aux adresses 40H et 41H de la mémoire interne. Le petit programme qui suit calcule la valeur de rechargement en fonction de la durée d'impulsion et stocke le résultat aux adresses adéquates.

Il est possible de choisir entre la durée standard de 50 ms et l'algorithme INTELLigent. Si le bit 38.3 (26.3H) est à 1, c'est ce dernier qui est utilisé. Ce bit peut être mis à 1 par:

DBY (38) =DBY (38).OR.8 H, et mis à 0 par: DBY(38) =DBY(38). AND.OF7H.

5. Opérateurs spéciaux

□ CBY (expr) (Code Byte)

L'installation CBY permet de récupérer un octet de la mémoire de programme ou de la mémoire de données du 8052. Comme il est impossible d'écrire dans la mémoire programme, il est impossible aussi d'affecter une valeur par CBY ([expr]). Seule la lecture est possible.

□ DBY ([expr]) (Data Byte)

L'instruction DBY permet à la fois de lire et d'écrire à une adresse de la mémoire interne du 8052. L'argument de DBY, comme la valeur à lire, doit être compris entre 0 et 255. C'est la logique même puisque la mémoire interne ne comporte que 256 octets et que cette instruction n'opère que sur la mémoire interne.

□ XBY ([expr]) (eXternal Byte)

L'instruction XBY ([expr]) permet à la fois de lire une valeur ou d'écrire à une adresse donnée de la mémoire extérieure. L'argument doit être compris entre 0 et 65535 (OFFFH). La valeur lue ou écrite doit être entre 0 et 255. Dans le cas contraire, le message d'erreur est BAD ARGUMENT ERROR.

□ GET

L'instruction GET ne donne de résultat significatif que dans le mode exécution (RUN). En mode commandes, le résultat est toujours 0. L'instruction GET lit le tampon d'entrée de la ligne sérielle et, si un caractère est présent, il en retourne la valeur. Si aucun caractère n'a été reçu, GET prend la valeur zéro. Après la lecture du caractère par le programme, GET reprend la valeur zéro. L'exemple suivant imprime la valeur décimale des caractères frappés au clavier du terminal.

□ IE

L'instruction IE permet d'autoriser ou d'inhiber les interruptions du microcontrôleur (*Interrupt Enable*). Le registre IE comporte huit bits, l'argument de l'instruction IE ne peut pas en comporter plus, il doit donc être compris entre 0 et 255. Parmi ces huit bits, il en est un que la version 8052 du microcontrôleur n'utilise pas (IE.6), sa valeur est indéfinie. Il est prudent, lors des lectures, de masquer ce bit qui pourrait fausser le résultat d'un test.

□ IP

Cette instruction sert à la manipulation du registre spécial IP (*Interrupt Priority*). Le registre IP comporte huit bits, l'argument de l'instruction IP ne peut pas en comporter plus, il doit donc être compris entre 0 et 255. Parmi ces huit bits, il en est deux que la version 8052 du microcontrôleur n'utilise pas (*IP.6 et IP.7*), leur valeur est indéfinie. Il est prudent, lors des lectures du registre IP, de masquer ces bits qui pourraient fausser le résultat d'un test.

□ PORT1

L'instruction PORT1 permet de lire et d'écrire dans le port d'entrée-sortie. P1. Les instructions de type *read-modify-write* ne sont pas autorisées. L'instruction `PORT1=PORT1. OR.01` pour mettre à le bit P1.0 risque de provoquer des surprises. Supposons que le bit 3 se trouve être à zéro. La valeur zéro sera lue et remplacée aussitôt sur le port. Si ce bit était utilisé en entrée et qu'il se trouvait à zéro pour une cause extérieure, il devient maintenant une sortie, toujours à zéro quelle que soit la tension appliquée à l'entrée. Il est indispensable d'utiliser une variable intermédiaire.

□ PCON

L'instruction PCON permet l'écriture et la lecture dans le registre spécial PCON. La version 8052 n'utilise que le bit le plus significatif de ce registre de huit bits. S'il est mis à 1, le débit du port sériel, déterminé par `TIMER/COUNTER 1`, est doublé.

□ RCAP2

L'instruction RCAP2 permet l'écriture et la lecture dans les registres spéciaux RCAP2H et RCAP2L. Elle manipule les deux registres comme un seul registre à zéro bits. Ce double registre contient la valeur de rechargement ou la valeur de capture du registre `TIMER2`. Les instructions suivantes permettent de connaître le débit du canal sériel.

□ T2CON

L'instruction T2CON sert à lire et à modifier le contenu du registre spécial T2CON. Ce registre pilote le compteur 2 (`TIMER/COUNTER2`) et détermine entre autres dans quel mode il fonctionne. Après la remise à zéro, le BASIC-52 charge la valeur 52 (`34H`). En principe elle ne doit être chargée. Un changement inconsidéré peut rendre le port sériel totalement inutilisable, jusqu'à la prochaine remise à zéro ;

□ TCON

L'instruction TCON sert à lire et à modifier le contenu spécial TCON. Ce registre pilote les compteurs 0 et 1 (`TIMER/COUNTER1`) il détermine lequel est actif, il régit les interruptions des compteurs et les interruptions extérieures. Après la remise à zéro, le BASIC-52 charge la valeur 244 (`OF4H`). Le BASIC suppose que cette valeur reste constante. Si le bit 4 est mis à zéro, l'horloge en temps réel s'arrête. Si le bit 6 est mis à zéro, le compteur 1 s'arrête et les sous-programmes de programmation d'EPROM, du canal sériel supplémentaire et des commandes PWM cessent de fonctionner. L'utilisateur sera très prudent dans les manipulations de TCON.

□ TMOD

L'instruction **TMOD** permet de lire et écrire la valeur du registre. Il régit les différents modes de fonctionnement des compteurs *TIMER0* et *TIMER1*. Après la remise à zéro, le BASIC-52 la valeur 16 (10_H). Cette valeur place le compteur **TMOD** en mode 0, le compteur 1 en mode 1. Le BASIC-52 suppose que l'utilisateur ne changera pas ces réglages.

- Si le compteur 0 n'est plus en mode 0, l'horloge en temps réel ne fonctionne plus correctement.
- Si le compteur 1 n'est en mode 1, le programmeur d'EPROM, le port sériel supplémentaire et la modulation de largeur d'impulsion (PWM) ne fonctionnent pas correctement.
- Si aucune de ces trois options n'est mise à profit, l'utilisateur peut utiliser le compteur à son gré.

□ TIME

L'instruction **TIME** est utilisée pour piloter une horloge en temps réel qui se trouve en standard dans le BASIC-52. Il est possible de lire la valeur de **TIME** et de lui affecter une valeur. Cette valeur est 0 à la mise sous tension ou lors de la remise à zéro. L'horloge démarre avec l'instruction **CLOCK1**. La variable **TIME** est augmentée de 1 toutes les cinq millisecondes. Le changement de valeur est cadencé par une interruption du compteur 0 (*TIMER/COUNTER0*). Il est essentiel que la valeur de la variable **XTAL** soit déclarée conformément à la fréquence du quartz, utilisé. Les valeurs affectées à la variable **TIME** s'expriment en secondes ; la partie décimale de l'argument de **TIME=** n'est pas prise en considération.

□ TIMER0

L'instruction **TIMER0** peut être utilisée pour lire et écrire le contenu des registres **TH0** et **TL0**. Elle manipule les deux registres **TH0** et **TL0** comme un seul membre à 16 bits. Le BASIC-52 utilise **TH0** et **TL0** pour l'horloge en temps réel. Ces registres sont à la disposition du programmeur s'il n'utilise pas l'horloge en temps réel.

□ TIMER1

L'instruction **TIMER1** peut être utilisée pour lire et modifier le contenu des registres **TH1** et **TL1**. Elle manipule les deux registres **TH1** et **TL1** comme un seul membre de 16 bits. Le BASIC-52 utilise **TH1** et **TL1** pour le port d'imprimante sérielle supplémentaire, le programmeur d'EPROM et la sortie en modulation de largeur d'impulsion. Le programmeur ne peut disposer des registres **TH1** et **TL1** que s'il n'utilise pas ces applications.

□ TIMER2

L'instruction **TIMER2** peut être utilisée pour lire et modifier le contenu des registres **TH2** et **TL2**. Elle manipule les deux registres **TH2** et **TL2** comme un seul nombre de 16 bits. Le BASIC-52 utilise **TH2** et **TL2** comme horloge (débit en bauds) du canal sériel. Le programmeur ne peut utiliser le compteur 2 que s'il n'utilise pas le port sériel.

□ XTAL

L'instruction **XTAL** sert à indiquer au **BASIC** la fréquence du quartz de l'oscillateur. La valeur de **XTAL**, exprimée en hertz, est utilisée pour l'horloge en temps réel, le programmeur d'EPROM et le port sériel supplémentaire.